

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID  
Facultad de Geografía e Historia



MASTER EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA  
(2012-2013)

**EVALUACIÓN DE LA EFICACIA PARA LA PREVENCIÓN DE  
INCENDIOS DEL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA  
BIOMASA FORESTAL EN EL MACIZO DE CAROIG.**

**(VALENCIA, ESPAÑA).**

**EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS FOR FIRE PREVENTION OF  
FOREST BIOMASS ENERGY UTILIZATION AT THE MASSIF OF  
CAROIG.**

**(VALENCIA , SPAIN).**

**Autora: Irma Fernández Migueláñez**

**Directores: Dr. Javier Madrigal Olmo**

**Dra. María Eugenia Pérez González**

**Dr. Luis Garmendia Salvador**

## Resumen

En el contexto del proyecto *Life Bioenergy and Fire Prevention* se ha considerado la necesidad de realizar un estudio exhaustivo de las implicaciones de la explotación de biomasa para la prevención de incendios forestales en el área denominada Macizo de Caroig, en el Oeste de la provincia de Valencia.

El problema que tienen muchas zonas mediterráneas con crecimientos bajos, fuertes pendientes (dificultad de mecanización) y escasez de mercado de madera es que estos aprovechamientos han dejado de ser rentables. La biomasa sería una alternativa comercial para los excedentes de madera en pie que tienen muchos montes actualmente sin explotación. Se está planteando en diversos foros que el impulso de estos aprovechamientos supondría además una mejora de la prevención de incendios por disminución de la biomasa existente. Lo cierto es que esta hipótesis está sin contrastar en tanto que existen dudas sobre qué intensidad deben tener los tratamientos o si sólo la extracción de arbolado sería suficiente para prevenir incendios, al menos la disminución del peligro de incendios de copa.

Por ello, el uso de los simuladores de incendios aplicados a la evaluación de tratamientos selvícolas puede cuantificar las diferencias existentes en el comportamiento del fuego entre la masa actual y la masa después de aplicar una serie de tratamientos selvícolas.

La creación de áreas cortafuegos aplicando la pertenencia difusa puede ayudar a flexibilizar las actuaciones ya que permite considerar la pendiente del terreno y degrada las zonas de desbroce, lo que puede facilitar su gestión, reduciendo los impactos visuales de diseños basados en buffer lineales, como los establecidos hasta ahora.

Tanto la utilización de los simuladores de incendios a escala paisaje, con el fin de aplicar medidas selvícolas con fines energéticos que ayuden en la prevención de incendios forestales en la zona estudiada, como la construcción de áreas cortafuegos mediante la pertenencia difusa, son técnicas pioneras en España, según la bibliografía consultada.

Los resultados obtenidos aplicando los tratamientos selvícolas establecidos en el proyecto *Life*, no suponen una medida significativa en la superficie afectada y en el comportamiento del fuego, lo que sugiere que para prevenir incendios se debería de actuar a escala paisaje cambiando los modelos de combustible.

La construcción de áreas cortafuegos mediante pertenencia difusa demuestra que la superficie estimada en el escenario *fuzzy* es significativamente menor que utilizando el buffer lineal, lo que supondría una optimización de los recursos a la hora de ejecutar el mantenimiento de las redes de cortafuegos flexibilizando su ejecución y minimizando el impacto visual.

## **Abstract**

In the context of Project Life+ Bioenergy and Fire Prevention it has been generally considered the need for an exhaustive study of the implications of biomass exploitation for the prevention of forest fires in the area called Massif of Caroig in the west of the province of Valencia.

The problem for many Mediterranean areas with low growth, steep slope (difficult for mechanization) and scarcity of wood markets is that they are no longer profitable. Biomass could be a commercial alternative for wood surplus in many currently unexploited mountains. It is being discussed in various forums that boosting these forest uses would also mean an improvement in fire prevention by decreasing the existing biomass. The truth is that this assumption is yet to be tested while there are some doubts about how hard should treatments be or whether trees removal would be enough to prevent fires, at least in decreasing the risk of crown fires.

Therefore, the use of fire simulators applied to the evaluation of silvicultural treatments can quantify the differences in fire behavior between the current tree mass and the tree mass after applying several silvicultural treatments.

The creation of firebreaks by applying the fuzzy logic can help to make performances more flexible since it allows to keep in mind the slope and degrades areas of scrub clearance, which may facilitate their management , reducing visual impacts based on linear buffer designs, such as those established so far.

Both the use of fire simulators at landscape scale, in order to implement silvicultural measures for energy purposes to assist in the prevention of forest fires in the studied area, and the firebreak building by fuzzy logic, are pioneering techniques in Spain , according to the literature.

The obtained results which come up applying the silvicultural treatments set in the project Life+, are not a significant extent in the affected area and in fire behavior, suggesting that, for fire preventions, actions should be taken at a landscape level changing the fuel models.

Building firebreaks using fuzzy logic shows that the estimated area in the fuzzy scenario is significantly smaller than using the linear buffer, which would mean an optimization of resources when running the firebreaks network maintenance making the execution more flexible and minimizing the visual impact.

## **Agradecimientos**

Este proyecto se ha llevado a cabo gracias a la ayuda del Laboratorio de Incendios Forestales del INIA (Centro de Investigación Forestal) por un largo verano trabajando en sacar adelante este proyecto y sobre todo por la ayuda de Javier Madrigal, por todo el apoyo y conocimientos que me ha transmitido durante la realización del proyecto.

También gracias a mis tutores del Máster en Tecnologías de la Información Geográfica, María Eugenia Pérez y Luis Garmendia, por haberse adaptado al cambio de tema de proyecto y por haber podido contar con ellos cuando lo he necesitado.

He contado también con la ayuda de diferentes organismos, como son la Generalitat Valenciana, el Consorcio de Bomberos de Valencia y el Proyecto *Life Bioenergy and Fire Prevention* que han hecho posible que los datos utilizados fueran lo más verídicos posible.

A la empresa Tecnosylva y al Laboratorio de Incendios Forestales de la Universidad de Córdoba por la facilitación de los simuladores Wildfire Analyst y Visual Cardin, para poder comparar sus ventajas e inconvenientes.

Y al Laboratorio de SIG, bases de datos y análisis territorial del Centro de Investigación Forestal del INIA por su gran ayuda en el procesamiento de la información.

Y agradecer a los que ya lo saben, familia y amigos, porque siempre están ahí para lo que les necesite.

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1.	ANTECEDENTES .....	1
1.1.1.	El aprovechamiento energético de la biomasa y la prevención de incendios .....	2
1.1.2.	Proyecto LIFE+ “Bioenergy and Fire Prevention” .....	3
1.2.	LOS INCENDIOS FORESTALES Y LOS SIMULADORES CARTOGRÁFICOS DE COMPORTAMIENTO DEL FUEGO .....	3
1.2.1.	Variables implicadas en el comportamiento del fuego.....	3
1.2.1.1.	Principales variables que describen los combustibles forestales: los modelos de combustible .....	4
a.	Modelos de combustible forestal.....	5
b.	Meteorología y topografía .....	7
1.2.2.	Comportamiento del fuego: modelos de simulación.....	8
1.2.3.	El simulador FARSITE .....	10
1.2.4.	Simuladores españoles.....	11
1.2.4.1.	El simulador WILDFIRE ANALYST .....	11
1.2.4.2.	El simulador Visual-Cardin .....	14
1.2.4.3.	El modelo MEDFIRE .....	15
1.3.	GESTIÓN DEL COMBUSTIBLE PARA PREVENIR INCENDIOS.....	15
1.3.1.	Sistemas y tratamientos de aprovechamiento forestal .....	16
1.3.2.	Evaluación de la eficacia preventiva de las actuaciones de gestión .....	18
1.4.	OBJETIVOS .....	18
2.	MATERIAL Y MÉTODOS .....	20
2.1.	ZONA DE ESTUDIO.....	20
2.1.1.	Localización .....	20
2.1.2.	Régimen de incendios .....	22
2.1.3.	Plan de prevención de incendios.....	24
2.2.	SIMULACIONES DE GRANDES INCENDIOS CON FARSITE .....	25
2.2.1.	Generación de puntos de inicio de incendios .....	25
2.2.2.	Fuentes de datos, información geográfica y variables consideradas.....	26
2.2.2.1.	Datos de entrada (Inputs) .....	27
2.2.2.2.	Ajustes.....	38
2.2.2.3.	Datos de salida (Outputs).....	39
2.2.3.	Descripción de escenarios de gestión .....	41
2.2.4.	Análisis estadístico .....	42
2.3.	ANÁLISIS DE ÁREAS CORTAFUEGOS Y LÓGICA FUZZY .....	43
2.3.1.	Planteamiento y justificación .....	43
2.3.2.	Análisis fuzzy .....	44
2.3.3.	Análisis estadístico .....	45
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	46
3.1.	ANÁLISIS DE LA EFICACIA PREVENTIVA DE ESCENARIOS SELVÍCOLAS Y DE GESTIÓN DE COMBUSTIBLE PARA LA OBTENCIÓN DE BIOMASA .....	46
3.2.	ANÁLISIS DE LA RED DE CORTAFUEGOS MEDIANTE LÓGICA FUZZY .....	53
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA LA GESTIÓN.....	55
5.	BIBLIOGRAFÍA.....	57

Figura 1. Demostración de la propagación elíptica según el principio de Huygens. ....	10
Figura 2. Diagrama de flujo de FARSITE. ....	11
Figura 3. Diagrama de flujo de Wildfire Analyst. ....	12
Figura 4. Ventana principal de Wildfire Analyst. ....	13
Figura 5. Tabla de áreas acumuladas por modelos de combustible de Wildfire Analyst. Derecha, en verde perímetro de incendio realizado con Wildfire Analyst, en naranja perímetro realizado en FARSITE.....	14
Figura 6. Apariencia de VISUAL-CARDIN y perímetro de incendio simulado. ....	15
Figura 7. Situación del Macizo de Caroig. ....	20
Figura 8. Régimen de incendios en el macizo de Caroig. Se indican el número total de incendios y la superficie afectada en el período considerado (1969-2012). ....	23
Figura 9. Demarcaciones forestales de la Comunidad Valenciana. ....	24
Figura 10. Puntos creados para la realización de las simulaciones localizados en el Macizo de Caroig. ....	26
Figura 11. Ventana de FARSITE.....	27
Figura 12. Model Builder elaborado para la organización del proceso de realización de la capa de cubierta vegetal. ....	28
Figura 13. Model Builder elaborado para la organización del proceso de realización de la capa de alturas. ....	29
Figura 14. Relación exponencial existente entre los datos de altura y diámetro (N=3521). ....	30
Figura 15. Model Builder elaborado para la organización del proceso de realización de la capa de densidad aparente.....	31
Figura 16. Ventana en la que se introducen los archivos de entrada en formato ASCII para la creación del paisaje. ....	32
Figura 17. Distintos gráficos que expresan la tendencia global de las temperaturas máximas (izquierda) y del índice de sequía (P/2T, P:Precipitación (mm), T: Temperatura (°C)) (derecha) de 2011 a 2040 para los meses de junio, julio y agosto. ....	34
Figura 18. Datos meteorológicos del incendio de Cortes de Pallás utilizados para realizar las simulaciones en el macizo de Caroig. ....	35
Figura 19. Datos de entrada necesarios para la creación del proyecto.....	36
Figura 20. Datos de entrada necesarios para crear el proyecto en FARSITE. Elevación (MDT05 descargado del IGN), Pendientes y Orientaciones (derivados del mapa de elevaciones en ArcGIS 10), Modelos de combustible (Consorcio de bomberos de Valencia), Cobertura vegetal y Altura de arbolado(procedentes de Model Buidier Figura 12 y 13 con datos LIDAR), Densidad aparente (realizada mediante Model Buidier Figura 15 a partir de alturas de arbolado), Altura de la superficie hasta inicio de copa(inventario forestal), Ajustes, Humedad, Personalización Modelos de combustible, Meteorología y Viento (Consorcio de Bomberos de Valencia, ficheros FARSITE, elaboración propia).....	37
Figura 21. Ventana de FARSITE donde se seleccionan las opciones de comportamiento del fuego.....	38
Figura 22. Ventana de FARSITE donde se selecciona la duración de la simulación (mes, día y hora del comienzo y del fin de la simulación). ....	38
Figura 23. Ventana de FARSITE donde se seleccionan los datos para exportar a ArcGIS 10. ....	39
Figura 24. Diferentes ráster de salida para un mismo punto de simulación libre en el escenario actual de modelos de combustible. FLI(Intensidad del frente de llama), FML (Longitud de llama),	

ROS (Velocidad de propagación), HPA (Calor por unidad de superficie), RCI (Intensidad de reacción), CFR (Subida a copa), TOA (Tiempo de llegada), SDR(Dirección de la propagación). ....	40
Figura 25. Resultados en formato de tablas y gráficos que ofrece FARSITE. ....	41
Figura 26. Función lineal Fuzzy Membership, (ESRI, 2012). ....	44
Figura 27. Media y rango de la desviación estándar (SD) de las variables de salida FARSITE para los escenario A y C: intensidad lineal (FLI), longitud de llama (FLA), velocidad de propagación (ROS) y calor por unidad de área (HPA). ....	48
Figura 28. Coeficientes escalados de superficies, según la interacción entre los escenarios A y D. ....	49
Figura 29. Coeficientes escalados de Intensidad del frente de llama (FLI), según la interacción entre los escenarios A y D. ....	50
Figura 30. Coeficientes escalados de la variable subida de fuego a copa, según la interacción entre los escenarios A y D. ....	51
Figura 31. Izquierda: Simulación escenario actual. Derecha, comparación entre los escenarios A y B, en el detalle se puede observar cómo han aumentado los perímetros (en colores) respecto a los del escenario A (en azul). ....	51
Figura 32. Izquierda: comparación entre los escenarios A y C, en el detalle se puede observar cómo los perímetros permanecen similares salvo en el punto 24, en el que se observan alteraciones. Derecha, comparación entre los escenarios A y D, en el detalle se puede observar cómo han disminuido los perímetros (en naranja) respecto a los del escenario A (en colores). ....	52
Figura 33. Detalle de los resultados obtenidos para el punto 3 (debido a que presentaba subida de fuego a copa). En la parte superior se muestran los cambios de intensidad del frente de llama (FLI) entre los escenarios A, C y D. En la parte inferior, se pueden ver las diferencias de calor por unidad de área (HPA) entre los escenarios A, C y D. ....	52
Figura 34. Resultados del análisis estadístico entre las superficies resultantes de construir un buffer lineal y otro mediante Cost Distance y pertenencia difusa. El Friedman ANOVA muestra diferencias significativas al 95% en ambos tipos de buffer para el cálculo de las superficies de actuación ( $p < 0,05$ ). ....	53
Figura 35. Áreas cortafuegos mediante pertenencia difusa y detalle de dos zonas, donde se puede observar los diferentes tamaños de los buffer.....	54

Tabla 1. Tiempo de retardo o medida de la rapidez con la que una partícula alcanza la humedad de equilibrio (situación en la que un combustible no gana ni pierde humedad con su ambiente). Se muestran las clases de tamaño para cada tiempo de retardo según el sistema americano. ....	5
Tabla 2. Descripción de los modelos de combustible definidos para la provincia de Valencia por el Consorcio de Bomberos y su equivalencia con los modelos de Scott y Burgan, (Quílez y Chinchilla, 2013). ....	6
Tabla 3. Esquema de los tratamientos propuestos para los pinares de <i>Pinus halepensis</i> en las comarcas de Enguera, Moixent y el Macizo de Caroig, (Tolosana, 2013). ....	17
Tabla 4. Usos del suelo de la zona de estudio según SIOSE 2011. Fuente: IDE Generalitat Valenciana, ( <a href="http://terrasit.gva.es/es">http://terrasit.gva.es/es</a> ). ....	21
Tabla 5. Superficie ocupada por cada modelo de combustible y su porcentaje respecto a la superficie total de la zona de estudio. ....	22
Tabla 6. Superficie (ha) y número de incendios forestales por año en el macizo de Caroig. ....	23
Tabla 7. Parámetros necesarios para el cálculo de la biomasa. ....	31
Tabla 8. Datos de la humedad de los combustibles. ....	32
Tabla 9. Caracterización modelos de combustible. ....	33
Tabla 10. Datos de meteorología. ....	35
Tabla 11. Datos de velocidad del viento y dirección a cada hora. ....	36
Tabla 12. Descripción de los archivos ráster de salida con sus extensiones y unidades. ....	39
Tabla 13. Resumen de los tratamientos selvícolas propuestos. ....	42
Tabla 14. Superficie modelos de combustible agrupados (ha). ....	45
Tabla 15. Medidas de las áreas cortafuegos según el orden y el modelo de combustible. ....	45
Tabla 16. Resultados del análisis estadístico (valores del estadístico U de Mann-Whitney y p-valor) entre los escenarios A y B, escenarios A y C y escenarios A y D. En rojo se muestran los valores con un nivel de significación mayor del 95%, en azul, mayor del 90%. ....	47
Tabla 17. Resultado de las superficies (m <sup>2</sup> ) buffer lineales y buffer fuzzy. ....	53
Tabla 18. Ejemplo extracción mediante rangos fuzzy. ....	54



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

La inclusión del riesgo de incendio en los planes de ordenación es un tema de investigación constante desde los años 80, (Van Wagner, 1983). Los incendios forestales tienen un efecto obvio en los resultados de la gestión forestal a través de la mortalidad del arbolado tras el incendio o la pérdida de valor de los pies que sobreviven. Al mismo tiempo, la gestión de las masas arboladas tiene la característica de modificar el comportamiento del fuego por cambios en la cantidad y la disposición espacial de los combustibles forestales. La manera de considerar el riesgo de incendio en el proceso de gestión forestal ha evolucionado desde los enfoques no espaciales donde el efecto del fuego estaba definido como una cantidad determinista o estocástica de pérdidas de madera a los más actuales, donde el comportamiento del fuego y sus componentes están siendo considerados con el fin de evaluar la extensión del daño producido por el fuego y la influencia de la modificación del combustible en el comportamiento del fuego, (González *et al.*, 2012).

En este sentido, evaluar adecuadamente el estado actual de los bosques es uno de los primeros pasos requeridos para la gestión forestal cuando el riesgo de incendio es considerado. La evaluación requiere la realización de un inventario preciso de los recursos y estimar la posible amenaza que el fuego tiene sobre esos recursos. Aunque, estimar el riesgo de incendio sobre el paisaje debe considerar que el incendio es un evento espacialmente explícito, y varía su comportamiento dependiendo de las condiciones del combustible en un sitio específico y de la disposición espacial de los diferentes combustibles. La dimensión espacial, que implica información sobre el estado del bosque y el comportamiento potencial del fuego a través del paisaje, es requerido con el fin de elegir los tratamientos más efectivos, en términos de tipo y distribución, que redujera el impacto negativo del fuego en el bosque, (Finney *et al.*, 2007).

Los beneficios de ejecutar tratamientos sobre los modelos de combustible para mitigar la severidad de los incendios forestales han sido documentados durante gran parte del siglo XX y se han revisado en los últimos años, (McIver *et al.*, 2009). Los efectos del tratamiento a largo plazo (es decir, los cambios de combustible a través del tiempo), son poco conocidos. Sólo existen unos pocos estudios de longevidad de los tratamientos preventivos e indican la disminución de los beneficios más allá de una década. Los efectos a nivel de paisaje desde diferentes pautas de tratamiento, siguen siendo en gran medida teóricos con algunas observaciones de los resultados del tratamiento en la alteración de comportamiento del fuego. Dada la dificultad de la aplicación de experimentos a gran escala y a largo plazo en el tratamiento de combustible, el uso de simuladores puede ser una herramienta bastante útil, (Finney *et al.*, 2007).

El simulador FARSITE (Finney, 1994) modela el comportamiento del fuego espacial y temporalmente. Fue originalmente desarrollado para predecir el comportamiento de incendios naturales prescritos. Posteriormente se fue ampliando el ámbito de aplicación y se usó para predecir incendios forestales (Finney, 1995) o para evaluar la efectividad de los tratamientos selvícolas y de gestión de combustibles para prevenir incendios forestales, (Stephens, 1998).

En España, existen trabajos sobre el uso de simuladores para la planificación contra incendios forestales en incendios de larga duración con el objetivo de definir el patrón de comportamiento de

los mismos, y poder establecer con mayor fiabilidad la estrategia de ataque ampliado más eficiente, (Molina, 2006).

### **1.1.1. El aprovechamiento energético de la biomasa y la prevención de incendios**

España se sitúa en tercer lugar de Europa en superficie forestal arbolada (18,3 millones de hectáreas en 2009), por detrás de Suecia y Finlandia y es el país de Europa con mayor incremento de superficie de bosque, con un ritmo anual del 2,19%, muy superior a la media europea (0,51 %). También es el país con mayor superficie forestal desarbolada (9,3 millones de hectáreas) donde España posee más del 40% de los matorrales y pastizales europeos, formaciones vegetales prácticamente inexistentes y por tanto singulares en muchos países europeos, lo que explica el interés de la Comisión Europea por protegerlos, (SECF, 2013).

La posibilidad anual (madera para extracción) es aproximadamente de 46 millones de metros cúbicos, siendo el volumen de cortas de 19 millones de metros cúbicos. La tasa de extracción por tanto es del 41% que contrasta con la tasa europea del 69%, (SECF, 2013). Por tanto, la posibilidad de extracción de biomasa arbórea sin perjudicar la sostenibilidad de los bosques españoles es, en principio, bastante elevada.

La definición que en la Directiva 2009/28 del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables define la biomasa como:

*“La fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales.”*

Entre los beneficios de la biomasa forestal se han citado: la seguridad de suministro (debido a que como se ha mencionado existe disponibilidad del recurso), la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero (entre un 55% y un 98%, en comparación con los combustibles fósiles), su potencial de creación de empleo y el desarrollo económico de zonas rurales (debido a que la totalidad de esta biomasa se extrae en áreas rurales en general con bajos niveles de desarrollo económico y despoblación).

La disminución del riesgo de incendios y facilidad de extinción, es otra de las ventajas más beneficiosas de la biomasa (Duralde *et al.*, 2012) mediante: la reducción de los residuos agrícolas y forestales que van a vertederos; reducción de la erosión y desertificación; contribución a la gestión del matorral para prevenir incendios, a la regeneración natural y al crecimiento y calidad de las masas forestales; mejora de la gestión forestal mediante la realización de planes de silvicultura sobre montes arbolados y matorral al eliminar la vegetación de competencia y mejora el estado fitosanitario de los montes reduciendo el riesgo de plagas y de contaminación ambiental.

Como consecuencia de estas ventajas y de la mejora de los sistemas de obtención de energía (térmica y eléctrica), la biomasa forestal se está proponiendo como una energía renovable de futuro, (APPA, 2012). Sin embargo impedimentos legales (moratoria sobre primas a la biomasa como energía

renovable) y técnicos (falta de rentabilidad de aprovechamientos forestales en áreas mediterráneas de baja producción forestal) están dificultando su puesta en marcha.

### **1.1.2. Proyecto LIFE+ “Bioenergy and Fire Prevention”**

En junio de 2010 fue aprobado por la Comisión Europea el proyecto LIFE+ *Bioenergy and Fire Prevention*, para un periodo de ejecución de octubre 2010 a septiembre de 2013. El objetivo principal es proponer una metodología que permita la ordenación de los Montes Públicos con aprovechamiento principal de biomasa compatible con la prevención de incendios forestales. Entre los socios se encuentran: Ayuntamiento de Moixent, Asociación de Municipios Forestales (AMUFOR), Eléctricas la Enguerina, Asociación Española para la valorización de la biomasa (AVEBIOM) e Iberdrola Renovables, (<http://www.bioenergy-project.eu/>).

El proyecto aborda la problemática existente respecto a tres aspectos íntimamente relacionados entre sí: el cambio climático, los incendios forestales y el desarrollo rural. En España, en los últimos 30 años, ha habido un incremento tanto del número de incendios como de la superficie incendiada en grandes incendios (mayores de 500 ha), provocando importantes daños a los bosques y al medio ambiente en general. Por otra parte, el abandono rural y la disminución de las actividades agroforestales agudiza este problema, el aumento de biomasa en los ecosistemas los hace fácilmente inflamables. De hecho son los incendios los verdaderos gestores de estos montes y las previsiones de cambio climático y el abandono de aprovechamientos forestales parece que agravarían este problema. Por tanto el aprovechamiento de la biomasa forestal para obtención de energía se puede convertir en la alternativa viable para rentabilizar los tratamientos selvícolas necesarios para gestionar estos montes de manera sostenible y ayudar así a la prevención de incendios.

Este proyecto europeo pretende dar una solución a la problemática de la gestión forestal mediterránea, a través de la generación de una economía rural estable a largo plazo, mediante el aprovechamiento de la biomasa y su compatibilidad con el aprovechamiento energético, la prevención de incendios forestales o el uso recreativo del monte. Por tanto se pretende resolver gran parte de las incógnitas planteadas cuando se realizan propuestas de aprovechamiento forestal con fines energéticos y se pretende que sirva de ejemplo y zona piloto para otras áreas mediterráneas de similar problemática.

## **1.2. Los incendios forestales y los simuladores cartográficos de comportamiento del fuego**

### **1.2.1. Variables implicadas en el comportamiento del fuego**

El fuego es resultado de un proceso químico llamado combustión, que se produce cuando a un material combustible se le aplica calor en presencia de oxígeno. La materia vegetal (combustible), que reacciona en este proceso, está compuesta esencialmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. Al aplicarle un foco de calor externo con suficiente energía para alcanzar la temperatura de ignición y en presencia de oxígeno, se produce una reacción. De la energía precisa para la combustión, una parte se disipa en el ambiente, y el resto calienta a más productos combustibles, aportando la energía de activación necesaria para que el proceso continúe, originando una reacción en cadena. La

transferencia de calor determina la ignición, combustión y extinción de la mayoría de los incendios. El calor se puede transmitir por: conducción, radiación, convección y por emisión de partículas en ignición, (Vélez, 2009).

La evolución de un incendio forestal estará regida por el denominado triángulo del fuego, condicionado por tres factores, que son los que determinarán las características del mismo: combustibles, topografía y meteorología.

Los combustibles determinan la facilidad de ignición y también la combustibilidad, es decir, la propagación del fuego dentro de una estructura vegetal compuesta por una serie de modelos estructurales de combustible.

La meteorología (radiación solar, precipitación, temperatura, humedad relativa, viento) afecta por una parte permitiendo el secado del combustible y por tanto afectando a la ignición del combustible y posteriormente variando el balance de energía transmitido por el incendio.

La topografía (elevación, pendiente y orientación) afecta a los dos factores anteriores, al combustible por el tiempo necesario para estar en condiciones de arder y a la meteorología, alterando sus condiciones, modificando corrientes de aire, apantallando y reflejando la energía y canalizando la propagación del incendio.

#### **1.2.1.1. Principales variables que describen los combustibles forestales: los modelos de combustible**

Existen una serie de factores determinantes para poder clasificar la vegetación en lo que se denominan “modelos de combustible”, que se caracterizan por ser una simplificación de la compleja realidad de una masa forestal que permite aplicar los modelos de comportamiento del fuego de una forma operativa. Todos los factores son relativos a características físicas o estructurales, excepto el caso de la cantidad de sustancias químicas, el cual es específico de las especies y otros factores ambientales.

1. Cantidad de combustible: se mide por la carga o peso por unidad de superficie ( $\text{kg/m}^2$ ,  $\text{t/ha}$ ). Cuanto mayor sea su magnitud, el incendio arderá con mayor intensidad. Suele caracterizarse según sus clases de tamaño. En el caso de caracterización de las copas, la carga (*Canopy Fuel Load* CFL) determina la disponibilidad de combustible para que un fuego de superficie suba a las copas (fuego pasivo de copas) y se propague finalmente (fuego activo de copas).
2. Tamaño y forma: este factor determina el tamaño de los combustibles y la relación entre el área superficial de la partícula y su volumen (SAV). Los combustibles más finos son los principales responsables de la propagación del incendio, ya que toda el agua y el calor pasan por el área superficial. Las clases de tamaño se caracterizan según su tiempo de retardo (*timelag*, Tabla 1) para establecer el equilibrio de humedad con el medio ambiente. Así las ramillas finas de pequeño tamaño tienen desde 1 hora de tiempo de retardo (1 htr) hasta 1000 htr los fustes más gruesos (1, 10, 100 y 1000 htr).

La relación superficie volumen (*Surface area-to-volume ratio* SAV) se determina en laboratorio y se suele expresar en  $\text{m}^{-1}$

3. Compactación y densidad aparente: determina dentro de una cantidad de combustible, qué porcentaje son partículas de combustible y qué porcentaje es el aire que se encuentra en esas partículas. Por tanto afecta a la velocidad de secado y a la velocidad de propagación, ya que cuanto más espacio haya entre partículas, los combustibles se secan con más rapidez y el incendio de superficie se propaga con más rapidez. En caso de incendios de copa esta relación es inversa, esto es, una disminución de la densidad aparente (*Canopy Bulk Density* CBD, kg/m<sup>3</sup>) genera una menor velocidad de propagación.
4. Continuidad horizontal y vertical: es la distribución de los combustibles en el plano horizontal y vertical. Define hacia donde se propagarán las llamas e influirá en la velocidad de avance del incendio. En el caso de masas arboladas la continuidad vertical determina la probabilidad de subida de fuego a las copas. La variable más utilizada es la altura de la primera rama viva (*Canopy Base High*, m).
5. Densidad de la madera: es la capacidad calorífica, la capacidad de la madera de absorber calor sin cambiar su temperatura. Los combustibles con muy poca densidad, tienen una capacidad calorífica muy baja, por lo tanto no necesitan mucho calor para que suba su temperatura hasta el punto de ignición.
6. Sustancias químicas: algunos combustibles contienen aceite cera o resina, sustancias que alteran el comportamiento del fuego y su poder calorífico.
7. Humedad del combustible (*Fuel moisture content* FMC): es el factor más determinante a la hora de clasificar los combustibles. Influye en la probabilidad de que se inicie el incendio, ya que antes de que el combustible arda es necesario evaporar el exceso de humedad que contiene, y en el comportamiento que adoptará. Se define como la cantidad de agua en el combustible, expresada como porcentaje del peso seco. Los combustibles vivos tienen una carga de combustible muy elevada, de manera que pueden actuar como retardante del incendio. Por eso la relación entre el combustible vivo y muerto es muy importante en ciertas combinaciones de combustible (disponibilidad del combustible para arder). Los combustibles muertos presentan humedades según sea su tamaño y las condiciones ambientales (tiempo de retardo, Tabla 1)

Tabla 1. Tiempo de retardo o medida de la rapidez con la que una partícula alcanza la humedad de equilibrio (situación en la que un combustible no gana ni pierde humedad con su ambiente). Se muestran las clases de tamaño para cada tiempo de retardo según el sistema americano.

CATEGORÍA DE TAMAÑO (mm)	TIEMPO DE RETARDO (horas)
Fino <6	1
Regular 5-25	10
Mediano 25-75	100
Grueso >75	1000

#### a. Modelos de combustible forestal

Un objetivo esencial en la gestión del fuego es predecir el comportamiento y los efectos de un incendio en la naturaleza. Para ello es necesario conocer la combustibilidad, entendida como la capacidad del sistema forestal para mantener y extender un fuego. El análisis de la combustibilidad se realiza mediante los denominados modelos de combustible basados en la estructura de la vegetación.

El Laboratorio de Incendios Forestales del Servicio Forestal Americano (NFFL), estableció cuatro grandes grupos de modelos de combustible según el tipo de vegetación que domina la combustión: pasto, matorral, hojarasca bajo arbolado y restos de operaciones selvícolas. Éstos se subdividen en función del tamaño y densidad de las especies, en 13 modelos diferentes que son los más popularmente utilizados.

Posteriormente, Scott y Burgan (2005) establecen siete grandes grupos: pasto (GR); pasto-matorral (GS); matorral (SH); hojarasca, pastizal y/o matorral bajo arbolado (TU); hojarasca y restos bajo arbolado (TL); abundantes restos bajo arbolado (SB); y zonas no combustibles (NB). A su vez, estos siete grandes grupos se subdividen hasta un total de 45 modelos distintos, (Scott y Burgan, 2005).

En España la mayoría de las Comunidades Autónomas han adoptado los 13 modelos clásicos del sistema americano para describir los combustibles, con las convenientes adaptaciones a los ecosistemas mediterráneos, (Vélez, 2009). Siguiendo la metodología de Scott y Burgan la Universidad de Córdoba ha desarrollado 40 modelos de combustible para Andalucía, (Rodríguez Silva y Molina, 2010). Recientemente, el Consorcio de bomberos de Valencia y la Unidad de Brigadas de Emergencia en base a los modelos de Scott y Burgan, también han propuesto una nueva clasificación de modelos de combustible para la provincia de Valencia, (Quílez y Chinchilla, 2013). Esta adaptación es debida a una gran diversidad de estructuras de matorral, y a la inclusión del concepto de modelos de pasto de terrenos rurales abandonados por la agricultura (Tabla 2).

Tabla 2. Descripción de los modelos de combustible definidos para la provincia de Valencia por el Consorcio de Bomberos y su equivalencia con los modelos de Scott y Burgan, (Quílez y Chinchilla, 2013).

	<b>Modelos Consorcio de Bomberos</b>	<b>Modelos Scott y Burgan 2005</b>
<b>Pastizal</b>	<b>1.- P1</b> Pasto $\leq 0,5$ m	GR 2(102) Baja carga de hierba en clima seco (Dinámico)
	<b>2.- P2</b> Pasto $\geq 0,5$ m y $\leq 1,5$ m	GR 4(107) Carga moderada de hierba en clima seco. (Dinámico) La altura se sitúa en torno a 70 cm.
	<b>3.- P3</b> Pasto $\geq 1,5$ m	GR 7(109) Carga muy alta carga de hierba en clima húmedo. (Dinámico) La altura se sitúa en torno a 1 m.
<b>Pastizal-matorral</b>	<b>4.- PM 1:</b> Pasto y matorral $\leq 1,20$ m	GS 2 (122) Carga moderada de hierba y matorral en clima seco (Dinámico). El matorral tiene entre 30 cm y 1 m y la carga de hierba es moderada.
	<b>5.- PM 2:</b> Pasto y matorral $\geq 1,20$ m	GS 4 (124) Alta carga de hierba y matorral en clima húmedo (Dinámico). La altura del combustible es superior a 60 cm
<b>Matorral</b>	<b>6.- M1</b> Matorral $\leq 0,30$ m	SH 2 (142) Carga moderada de matorral en clima seco. La altura del matorral es de 30 cm.

<b>Matorral</b>	<b>7.- M2</b> Matorral $\geq 0,30$ m y $\leq 1,20$ m	Interpolar entre SH 2 y SH 5
	<b>8.- M3</b> Matorral $\geq 1,20$ m	SH 5 (145) Carga alta de matorral en clima seco. La altura del matorral está entre 1,2 y 2 m. (SH 7 Carga muy alta).
<b>Matorral bajo arbolado</b>	<b>9.- MA1</b> Matorral con regeneración de arbolado.	TU 4 (164) Coníferas pequeñas con restos. La propagación principal es por la hojarasca con pasto presente y pies pequeños de pinos.
	<b>10.- MA2</b> Matorral $\leq 1,20$ m bajo arbolado adulto	Interpolar entre TU 1 (161) Baja carga de combustible de madera, pasto y matorral en clima seco bajo dosel arbóreo y TU 5 (165) Carga muy alta de madera y matorral en clima seco bajo dosel arbóreo.
	<b>11.- MA3</b> Matorral $\geq 1,20$ m bajo arbolado adulto	TU 5 (165) Carga muy alta de madera y matorral en clima seco bajo dosel arbóreo.
	<b>12.- MA4</b> Restos leñosos junto con arbolado adulto	TL 5 (185) Carga elevada de coníferas caídas.
<b>Hojarasca bajo arbolado</b>	<b>13.- HA</b> Hojarasca bajo arbolado.	TL 1 (181) Pequeña carga de ramillas de coníferas. El fuego es propagado por la hojarasca presente, situándose la profundidad del combustible entre 2,5 y 5 cm. Modelo de <i>Pinus pinaster</i> TL 8 (188) Mantillo de acículas largas.

### b. Meteorología y topografía

La temperatura y humedad relativa del aire determina la disponibilidad a arder de los combustibles más finos (1 y 10 htr) y por tanto son variables críticas para conocer el comportamiento del fuego.

El tercer factor fundamental es el viento, tanto la velocidad como la dirección, ya que determina en gran parte la velocidad de avance del frente de llama. La composición de los vectores viento con la pendiente del terreno, determina la dirección de avance del frente de llama. Además la meteorología y topografía local determinan el comportamiento de vientos locales y la aparición de fenómenos como los vientos terrales, los vientos de ladera y los vientos de valle, que se deben tener en cuenta en las predicciones.

La interacción del comportamiento del fuego con la meteorología y topografía local da lugar a fenómenos como los remolinos de fuego, pirocúmulos y fuegos convectivos, (Quílez, 2013). Los fenómenos de comportamiento extremo como las inversiones térmicas, los reventones secos, (Cacho *et al.*, 2009) los fuegos de copa y los fuegos eruptivos, (Vieigas y Simeoni, 2011) son de difícil simulación y en los que intervienen tanto la meteorología como la topografía. En la actualidad se sigue investigando sobre los modelos que los describen o los que los puedan predecir.

### 1.2.2. Comportamiento del fuego: modelos de simulación

El comportamiento del fuego se puede predecir en base a modelos que pueden ser (Guijarro, 2003):

1. De tipo empírico, basados en datos analizados mediante la herramienta estadística en base a datos recogidos en incendios y quemas experimentales. Tanto el sistema canadiense como el sistema australiano de predicción del comportamiento del fuego forestal utilizan este tipo de modelos que por tanto son más eficaces en los ecosistemas en los que se han desarrollado. No obstante alguna de las herramientas usadas por dichos modelos como el índice de peligro canadiense FWI es mundialmente utilizado y actualmente es el que adopta la UE para clasificar el peligro de incendios forestales, (<http://forest.jrc.ec.europa.eu/effis/>). En España se han desarrollado diferentes modelos empíricos del comportamiento del fuego por parte del Centro de Investigaciones Forestales de Lourizán (Vega *et al.*, 1998) obtenidos a partir de quemas experimentales en masas de matorral de Galicia.
2. De tipo físico, basados en los procesos de transmisión de calor y el balance energético. Actualmente existen diversos modelos físicos para simular incendios forestales. Uno de los más avanzados es el modelo físico FIRETEC que está basado en la dinámica de los fluidos y tiene en cuenta los procesos físico-químicos de intercambio de energía, en este caso aplicados al avance del fuego a través de una masa forestal o de matorral. Presenta unos tiempos de computación aún inasumibles para su uso en la planificación de la extinción pero ha mostrado buenos ajustes con el comportamiento real, tanto en experimentos a escala de laboratorio (Marino *et al.*, 2012) como a escala de campo, (Linn, 1997; Pimont, 2009). También se han obtenido resultados aceptables de ajuste en experimentos de quemas con matorral usando el simulador físico WFDS (Jiménez *et al.*, 2013) que se utiliza con frecuencia en la predicción del comportamiento del fuego en edificaciones y obra civil.
3. Modelos mixtos físico-matemáticos o semi-empíricos como el de Rothermel (1972), el más utilizado mundialmente. Se basan en la física de la combustión pero los parámetros y condiciones de contorno están fijadas en base a experimentos de campo y laboratorio. Este modelo se ha aplicado en diferentes desarrollos informáticos por parte del sistema forestal americano ([www.fire.org](http://www.fire.org)) que finalmente han dado como resultado el paso a simuladores cartográficos como el programa FARSITE (Finney, 1998). Las salidas de simulaciones de incendios en forma de mapas son utilizados por los medios de extinción durante el incendio, pero también posteriormente al incendio, para tener una idea aproximada de la intensidad generada durante el proceso de propagación. Para los gestores de la zona, este mapa de intensidades u otros mapas de severidad o afectación que se pueden generar a través de imágenes de satélite son de gran utilidad ya que la intensidad del incendio determina en gran parte el grado de afectación de la vegetación y por tanto su capacidad de regeneración. Además estos simuladores se utilizan como herramienta en la toma de decisiones para priorizar estrategias preventivas, simulando incendios en gabinete para detectar zonas vulnerables o comprobar la eficacia de medidas preventivas propuestas. En España se desarrolló el simulador CARDIN (Martínez-Millán *et al.*, 1993) que actualmente se ha implementado como VISUAL-CARDIN por la Universidad de Córdoba, que utiliza el modelo de Rothermel para calcular las salidas básicas de predicción del comportamiento del fuego: velocidad de avance del frente de llama (m/min), longitud de llama (m), intensidad lineal del



frente de avance (kW/m) y calor por unidad de área (KJ/m<sup>2</sup>) y también el simulador Wildfire Analyst.

Todos los simuladores utilizan, además del modelo del comportamiento del fuego subyacente, una técnica de simulación que representa la propagación del fuego en el terreno. Cada técnica de simulación difiere de otras en cómo representan el terreno y el proceso de propagación. El terreno puede ser visto como una malla de celdas discretas, donde la propagación del fuego de una celda a otra está gobernada por un conjunto específico de reglas o por probabilidad de ocurrencia. Otra forma, es modelar la línea de fuego por funciones matemáticas sobre un terreno visto como un medio continuo. Las más utilizadas son:

- Bond Percolation. Esta técnica representa el terreno como una malla de celdas cuadradas, triangulares o rectangulares. El fuego propaga desde una celda a otra celda vecina que contenga combustible en disposición de arder. El usuario puede ajustar la probabilidad de propagación para una dirección de propagación debido a factores como viento, topografía y diferencias entre los tipos de combustibles. Si muchas celdas contienen combustible sin quemar y la probabilidad de propagación es alta, el fuego se propaga a través de la malla. Debido a que esta técnica no se basa en las características físicas de la propagación, la efectividad de la simulación es limitada a condiciones similares para las que la técnica fue sintonizada.
- Propagación elíptica. Esta técnica proyecta el terreno como un medio continuo, considerando la propiedad de que bajo condiciones uniformes el crecimiento del fuego en dos dimensiones es elíptico, entonces, esta aproximación implementa el crecimiento del fuego utilizando las propiedades de comportamiento del fuego junto a las propiedades matemáticas de las elipses.

Teniendo en cuenta esta propiedad, Anderson *et al.* (1982) proponen definir puntos espaciados regularmente en el perímetro de la línea de fuego donde cada uno representa un fuego pequeño independiente que se propaga de forma elíptica, donde el tamaño y forma de cada elipse están determinados por las condiciones locales. El perímetro de la línea de fuego (total) a cada paso de tiempo es definido por todas las pequeñas elipses (Figura 1).

Para este grupo de elipses se han desarrollado ecuaciones diferenciales que describen la propagación del fuego para combustible heterogéneo, topografía no uniforme y clima variable. En esta implementación, se utiliza el principio de Huygens, donde el frente del fuego es propagado como un polígono en continua expansión. El polígono es definido como una serie de vértices (2 dimensiones, puntos en las coordenadas X, Y). El número de vértices crece al crecer el frente del fuego a medida que transcurre el tiempo (expansión del polígono). Las ecuaciones diferenciales del modelo describen la expansión de una onda elíptica desde una serie de vértices que definen los bordes del fuego.

Richards (1990, 1995) implementa el principio de Huygens como método para simular el crecimiento de una línea de fuego en incendios forestales. Esta técnica es la utilizada por simuladores como FARSITE y VISUAL-CARDIN, que añade una pequeña modificación, ya que en vez de elipse utiliza una cardioide.

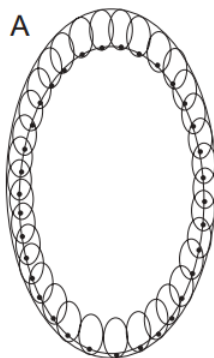


Figura 1. Demostración de la propagación elíptica según el principio de Huygens.

- Autómatas Celulares. Esta técnica representa el terreno como una malla de celdas, donde cada celda contiene un conjunto de valores (pendiente, tipo de combustible, orientación, etc.). Cada celda comienza en un estado inicial, y la probabilidad de propagar el fuego a cada celda en la malla está determinada por el mismo conjunto de reglas para todas las celdas. Se iteran sucesivos pasos, siempre comenzando desde la celda con menor tiempo de ignición, propagando así el fuego hacia las celdas vecinas. Al propagar el fuego desde una celda a sus 8 celdas vecinas, la forma final del fuego queda fuertemente distorsionada. Existen distintas aproximaciones, algunas intentan reducir esta distorsión incrementando el número de vecinos de cada celda, modificando la forma de las celdas, modificando el tamaño de las celdas a medida que el fuego avanza, etc.

### 1.2.3. El simulador FARSITE

El objetivo de FARSITE es simular el desarrollo y el comportamiento de fuegos bajo condiciones variables del terreno, combustibles y meteorológicas. También es un modelo determinístico pues se pueden relacionar los resultados directamente con los datos de entrada. Incorpora los modelos existentes para fuegos de superficie, fuegos de copas a través de las ecuaciones de Van Wagner (1977, 1993), saltos de fuego y aceleración del fuego en un modelo bidimensional de crecimiento del fuego. El frente de llama se modela por medio del principio de propagación de ondas de Huygens mediante datos SIG introducidos en el programa, tales como elevación, pendiente, orientación, tipos de combustibles y cubierta.

La principal ventaja de este sistema es la utilización en proyecciones a largo plazo de incendios forestales activos en diferentes escenarios climatológicos para analizar cómo puede cambiar el crecimiento del incendio dependiendo del tipo de tiempo existente. También puede utilizarse para examinar la efectividad de los tratamientos realizados o hacer predicciones sobre qué sucedería si se iniciase un fuego en un punto determinado bajo condiciones meteorológicas dadas.

El principal inconveniente de la utilización de FARSITE es que requiere temas de datos SIG organizados y aporte detallado y explícito de meteorología y viento para cada escenario que se pretenda simular antes de realizar la simulación por lo que no es posible esperar a tener información del incendio antes de tener organizados y creados los temas SIG, (<http://www.firemodels.org/index.php/national-systems/farsite>).

Los pasos previos a una simulación están representados en el diagrama de flujo (Figura 2).

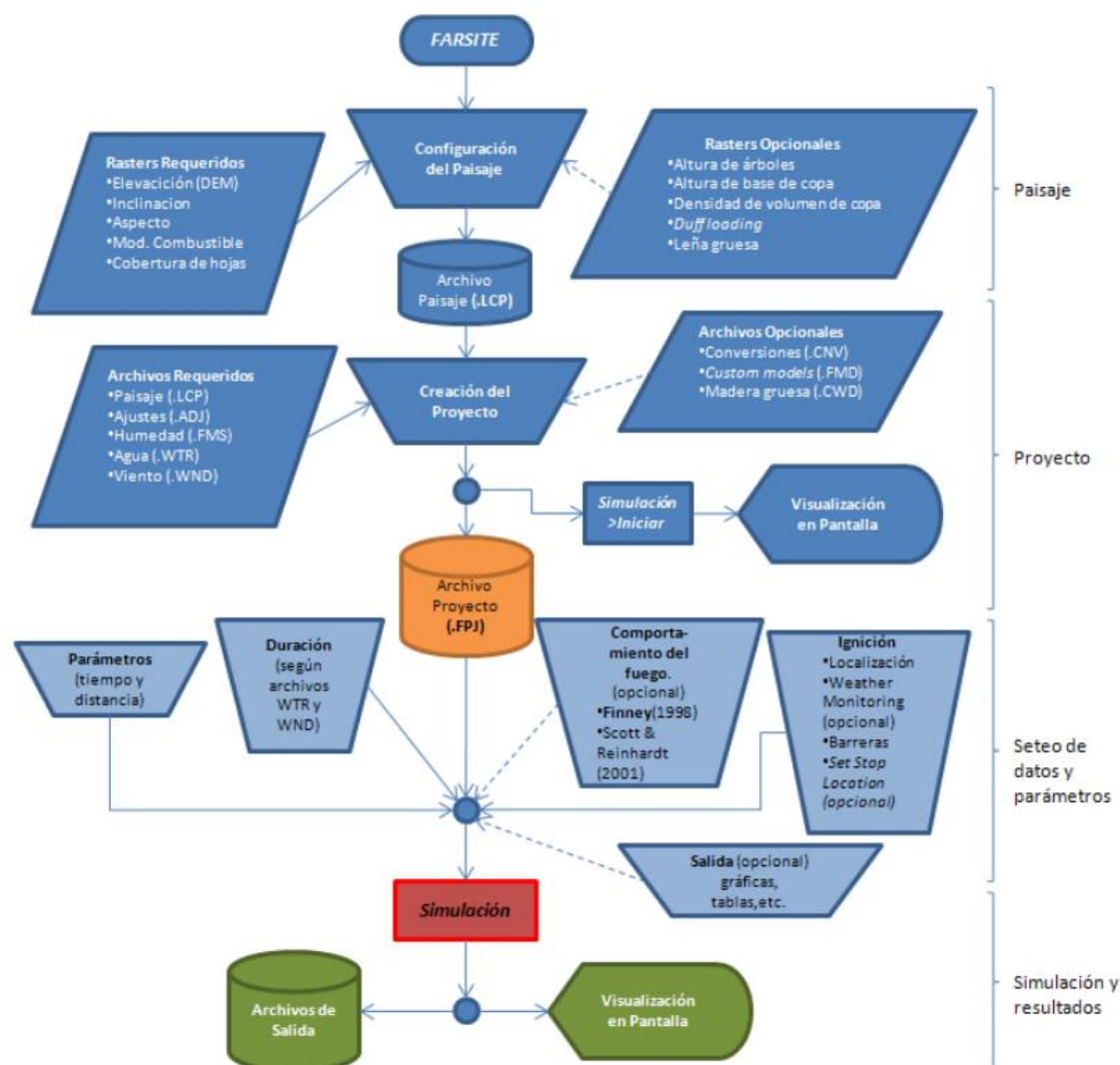


Figura 2. Diagrama de flujo de FARSITE.

#### 1.2.4. Simuladores españoles

##### 1.2.4.1. El simulador WILDFIRE ANALYST

Wildfire Analyst™ es un software comercial de simulación de incendios, creado por TECNOSYLVA S.L. en 2011, que proporciona análisis en tiempo real de la progresión de los incendios forestales, el comportamiento del fuego y las capacidades de supresión y análisis de impacto durante un incidente. Su objetivo principal es ser utilizado en las operaciones reales por lo que la recogida de datos para crear mejores bases de datos del comportamiento del fuego y mejorar los modelos existentes es fácil. Wildfire Analyst™ introduce nuevos modos de simulación con mejoras innovadoras, entre ellas el rendimiento real de tiempo de procesamiento, la tasa de propagación automática (ROS), ajustes basados en observaciones que se utilizan para crear bases de datos de comportamiento del fuego, el cálculo de las zonas horarias de evacuación, el análisis posterior en tiempo e integración de los resultados de la simulación de activos y análisis del impacto económico.

El modelo de propagación predeterminada implementado en la herramienta WFA es el modelo de Rothermel (1972) y las modificaciones propuestas por Albini (1976) junto con el modelo de fuego de copas propuesto por Rothermel (1991). Acepta los modelos de combustible de Scott y Burgan (2005), así como modelos personalizados de combustible. También pone en práctica uno de los modelos empíricos existentes, el propagador de incendios chileno KITRAL.

A diferencia de otros simuladores, aprovecha las múltiples funcionalidades que se pueden realizar con el software SIG, la plataforma central se basa en ArcGIS™ ArcEngine 9,3 y 10, por lo que para la creación del escenario se necesita un proyecto .mxd creado en ArcGIS con la información del modelo de elevaciones y los modelos de combustible, (<http://www.wildfireanalyst.com/help/spanish/index.html>).

Los pasos previos a una simulación están representados en el diagrama de flujo (Figura 3).

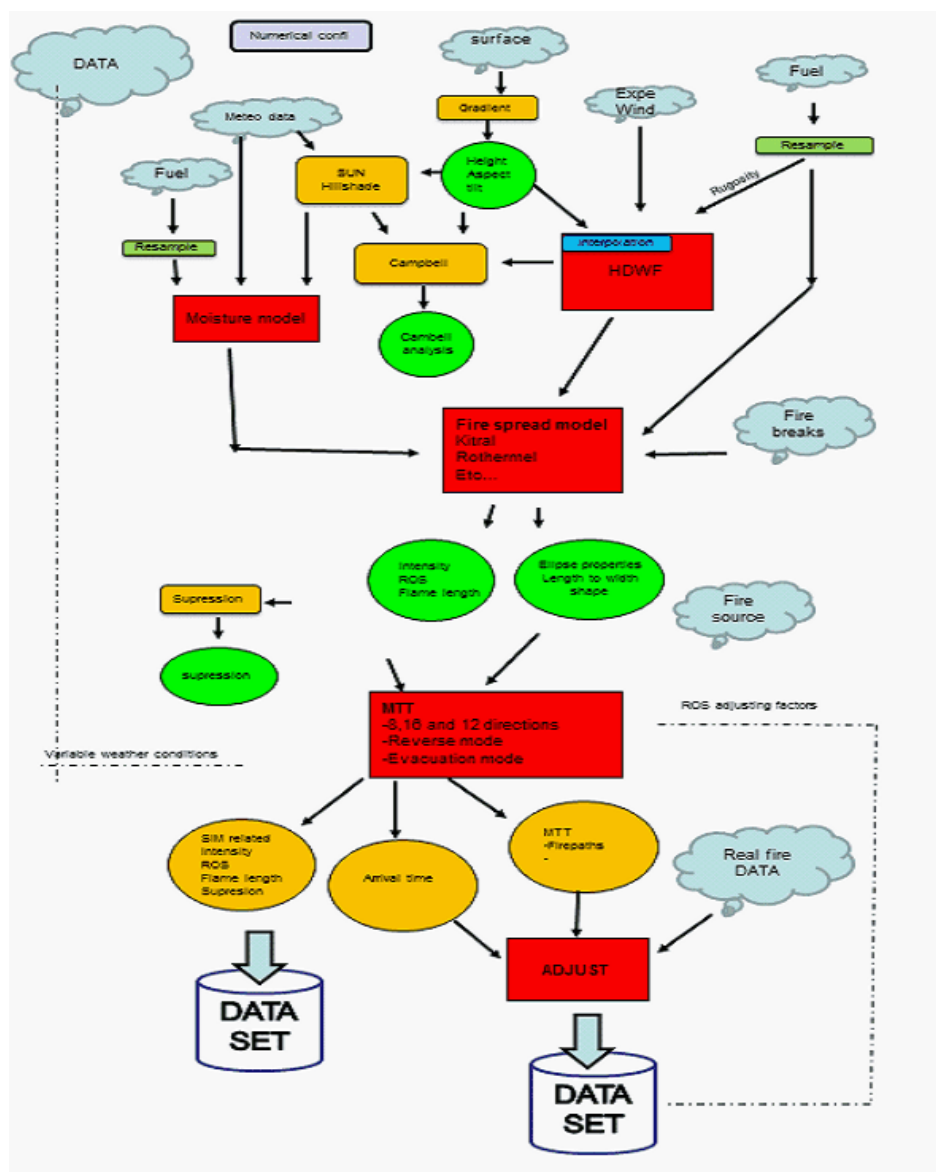


Figura 3. Diagrama de flujo de Wildfire Analyst.

Los datos de entrada que necesita este simulador son los mismos que necesita FARSITE. Los datos de salida los ordena en un archivo de texto, que contiene todas las gráficas de los distintos parámetros calculados. La ventaja que tiene este simulador es que acumula los datos según los modelos de combustible por los que va pasando el fuego (Figura 5).

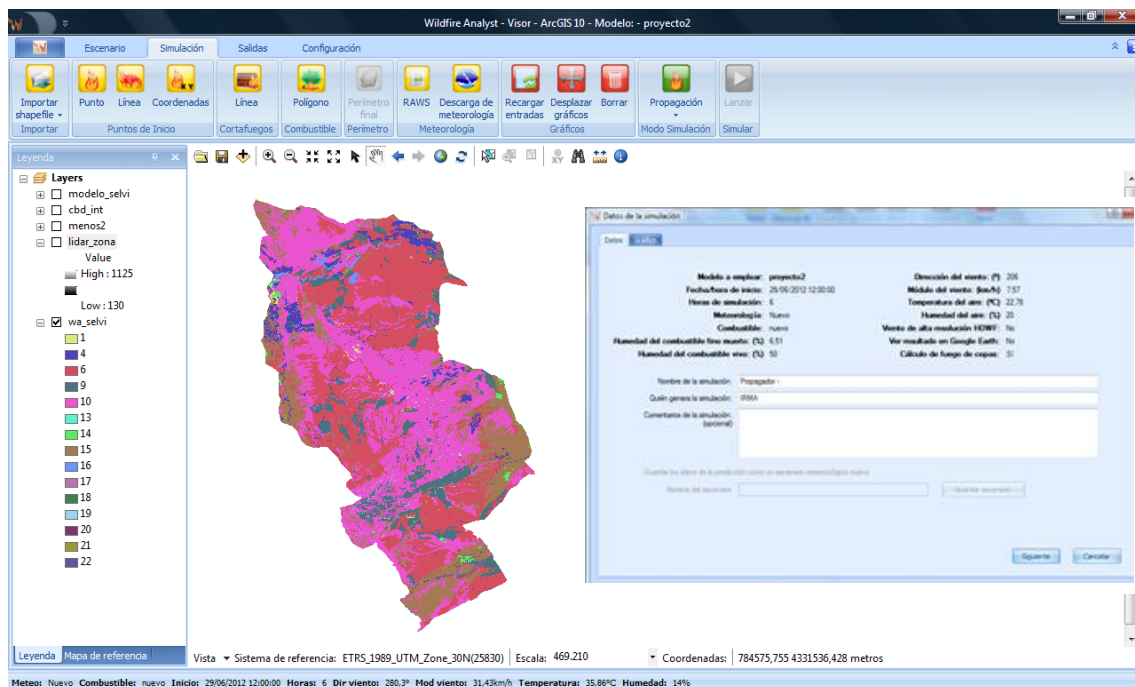


Figura 4. Ventana principal de Wildfire Analyst.

Minutos	M <sup>2</sup>	Combustible		P1	PM1	
		M1	MA2			
0	Area	0	70000	20000	0	90000
	Acum	0	70000	20000	0	90000
30	Area	0	310000	105000	0	415000
	Acum	0	380000	125000	0	505000
60	Area	5000	522500	232500	2500	762500
	Acum	5000	902500	357500	2500	1267500
90	Area	102500	875000	167500	0	1145000
	Acum	107500	1777500	525000	2500	2412500
120	Area	110000	1007500	85000	0	1202500
	Acum	217500	2785000	610000	2500	3615000
150	Area	225000	1000000	65000	0	1290000
	Acum	442500	3785000	675000	2500	4905000
180	Area	342500	945000	95000	0	1382500
	Acum	785000	4730000	770000	2500	6287500
210	Area	472500	707500	20000	17500	1217500
	Acum	1257500	5437500	790000	20000	7505000
240	Area	202500	855000	0	25000	1082500
	Acum	1460000	6292500	790000	45000	8587500
270	Area	107500	967500	0	7500	1082500
	Acum	1567500	7260000	790000	52500	9670000
300	Area	82500	652500	0	2500	737500
	Acum	1650000	7912500	790000	55000	10407500
330	Area	82500	610000	0	0	692500
	Acum	1732500	8522500	790000	55000	11100000
360	Area	2500	400000	0	0	402500
	Acum	1735000	8922500	790000	55000	11502500



Figura 5. Tabla de áreas acumuladas por modelos de combustible de Wildfire Analyst. Derecha, en verde perímetro de incendio realizado con Wildfire Analyst, en naranja perímetro realizado en FARSITE.

#### 1.2.4.2. El simulador Visual-Cardin

Visual-Cardin es un programa informático de simulación de la propagación del fuego creado por la Universidad de Córdoba, de utilidad tanto para la planificación de las estrategias de combate en la lucha contra los incendios forestales, como en la planificación de la defensa de las áreas forestales contra los incendios. Está basado en el modelo de propagación de fuegos de superficie (Rothermel, 1972), y emplea como figura geométrica de expansión y desarrollo espacial, la función matemática de la Cardioide "modificada", (Martínez-Millán, 1991). El modelo permite incorporar los efectos de la variabilidad de la intensidad y dirección del viento como consecuencia de la topografía, para ello emplea la simulación de campos de vientos que proporciona el modelo Nuatmos, (Ross *et al.*, 1988). El programa se corresponde con una versión actualizada programada en VisualBasic® de los programas Cardín (Martínez-Millán *et al.*, 1991), y Arcar-Cardín.

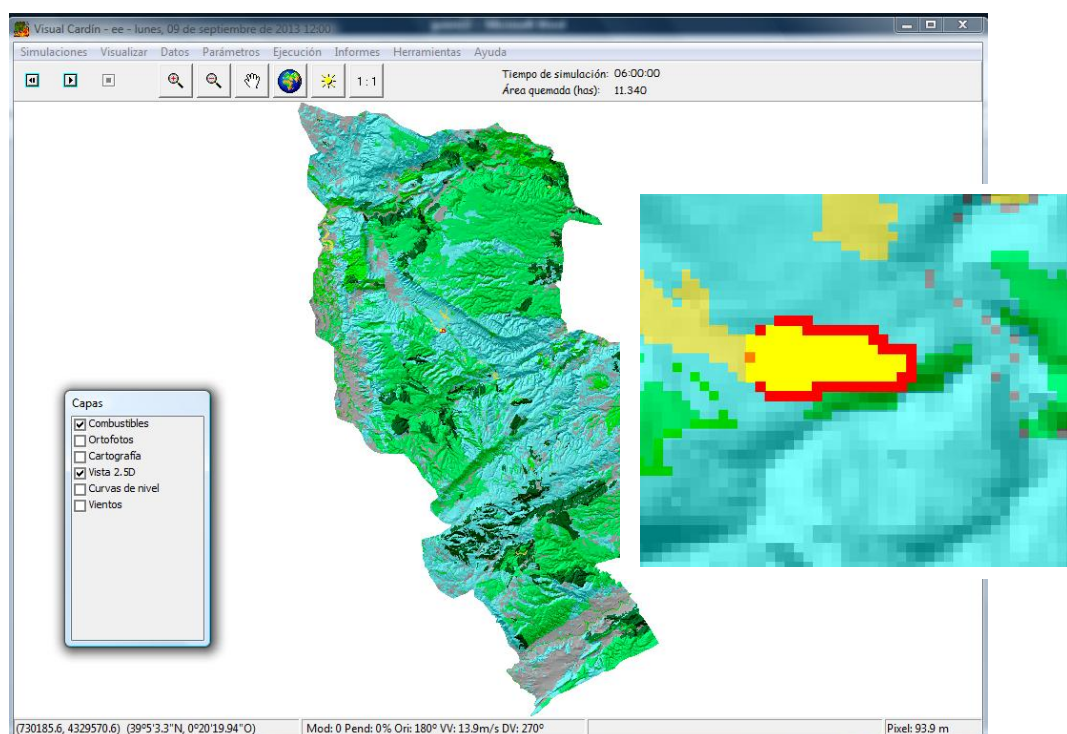


Figura 6. Apariencia de VISUAL-CARDIN y perímetro de incendio simulado.

#### 1.2.4.3. El modelo MEDFIRE

El modelo MEDFIRE es un modelo estocástico creado por CREA (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals), que tiene como objetivo examinar la interacción espacial entre los incendios forestales y la dinámica de la vegetación en paisajes heterogéneos. Se ha diseñado para modelar diferentes conductores del régimen de fuego a través de la investigación de sus efectos relativos en la distribución anual de áreas quemadas resultantes, distribución del tamaño del fuego composición del paisaje en escalas de corto y medio plazo en un contexto mediterráneo. El modelo permite la caracterización de la variabilidad espacial en la quema y la cubierta terrestre bajo diferentes escenarios climáticos y estrategias de extinción de incendios. El modelo MEDFIRE asume que el principal motor de régimen de incendios es el clima y que los elementos clave de régimen de incendios, tales como el tamaño del fuego pueden ser modulados por la extinción de incendios activos, (<https://sites.google.com/site/medfireproject/medfire>).

### 1.3. Gestión del combustible para prevenir incendios

La gestión de los combustibles tiene como objetivo reducir la biomasa mediante una gestión preventiva que modifica las características de inflamabilidad y combustibilidad de la masa forestal, su continuidad vertical y horizontal, carga, tamaño, compactación y humedad, así como el tipo de especie cuando esto sea posible, con el fin de disminuir el riesgo de incendio. (Stephens y Moghaddas, 2005).

La selvicultura preventiva de incendios constituye un conjunto de reglas y recomendaciones a incluir en la práctica selvícola habitual, no es una actividad independiente. Cuando no hay práctica selvícola habitual, no hay prevención. Debe ser coherente con las condiciones ecológicas, sociales y



económicas de cada comarca. El triple objetivo de la selvicultura preventiva de incendios es: disminuir el número total de siniestros; aminorar los daños, especialmente la superficie recorrida, en caso de que el incendio se produzca; facilitar y dar seguridad a las labores de extinción. La selvicultura de prevención de incendios se basa esencialmente en modificar la combustibilidad de las masas a través de la extracción de determinados tipos de combustibles y la alteración de su continuidad, (Serrada, 2008).

Entre los métodos de gestión se encuentran las quemas prescritas, el pastoreo controlado, el empleo de fitocidas (prohibidos en España), y los tratamientos mecánicos (podas y desbroces).

Las quemas prescritas persiguen reducir la intensidad del fuego y propiciar un cambio en su régimen (estación, severidad, frecuencia, tipo de fuego).

La introducción del ganado en los montes permite la disminución de la carga, la mayor compactación de los combustibles muertos y crea discontinuidades en el combustible.

El desbroce mecánico requiere el empleo de maquinaria adaptada a los distintos combustibles y terrenos. Deben considerarse las astilladoras que permiten el aprovechamiento energético de los combustibles extraídos, (Vélez, 2009).

La aplicación de los diferentes métodos de control de combustible puede aplicarse a nivel superficial, gestionando áreas en el interior del monte donde se quiere reducir la carga y estructura de los combustibles. Por otro lado las labores preventivas se centran también en la creación y mantenimiento de redes cortafuegos, cuyo objetivo es servir de apoyo al dispositivo de extinción, ofreciendo infraestructuras lineales seguras y en donde se pueden establecer oportunidades para controlar los frentes de llama durante un incendio forestal. Estas áreas son superficies relativamente anchas en la que la vegetación natural, densa y muy inflamable, se modifica para conseguir otra vegetación de menor biomasa o menos inflamable, con el fin de que se detengan los fuegos de suelo que lleguen hasta ella o puedan controlarse más fácilmente, sirviendo de base para establecer líneas de defensa, (Duralde *et al.*, 2012).

### **1.3.1. Sistemas y tratamientos de aprovechamiento forestal**

Los tratamientos de aprovechamiento forestal son la manera de aplicar la selvicultura propuesta en las masas arboladas objeto de actuación. Los tratamientos selvícolas se basan en dosificar la competencia existente entre los árboles para mejorar el estado de la masa y concentrar el crecimiento en un menor número de árboles con mayor valor comercial. Esto se traduce en que los tratamientos que no suponen la corta de árboles enteros (desbroces, podas), o los procedentes de primeras claras de pies de diámetros bajos, no son rentables ni interesantes para la industria maderera (madera de aserrío, celulosa, trituración). Por ello, estos tratamientos necesarios para la formación y mejora de las masas (clareos, podas, resalveos, trasmoches...) que tradicionalmente no han sido rentables, se plantea la posibilidad de aprovecharlos con fines energéticos y con ello ayudar al desarrollo de la masa y a fomentar la protección contra plagas, enfermedades e incendios forestales. Lógicamente el aprovechamiento de fustales maduros con diámetros grandes (mayores de 35 cm) que son rentables para la industria maderera son también rentables para su aprovechamiento energético.



El problema en muchas zonas mediterráneas con crecimientos bajos, fuertes pendientes (dificultad de mecanización) y escasez de mercado de madera es que estos aprovechamientos han dejado de ser rentables. La biomasa sería una alternativa comercial para los excedentes de madera en pie que tienen muchos montes actualmente sin explotación. Se está planteando en diversos foros que el impulso de estos aprovechamientos supondría además una mejora de la prevención de incendios por disminución de la biomasa existente. Lo cierto es que esta hipótesis está sin contrastar en tanto que existen dudas sobre qué intensidad deben tener los tratamientos o si sólo la extracción de arbolado sería suficiente para prevenir incendios, al menos la disminución del peligro de incendios de copa.

Los tratamientos selvícolas propuestos dentro del proyecto *Bioenergy and Fire Prevention* para aprovechar la biomasa con fines energéticos se resumen de forma esquemática en la Tabla 3:

Tabla 3. Esquema de los tratamientos propuestos para los pinares de *Pinus halepensis* en las comarcas de Enguera, Moixent y el Macizo de Caroig, (Tolosana, 2013).

Repoblado <sup>1</sup> o monte bravo <sup>2</sup> post-incendio	Clareo sistemático o semiselectivo		
Parcelas de estructura “regular”	Latizal <sup>3</sup>	Densidad elevada	Claras fuertes o moderadas según calidad de estación y matorral. Posibles desbroces.
		Densidad no elevada	Esperar / posibles desbroces.
	Fustal <sup>4</sup>	Cortas de regeneración	Aclareo sucesivo en 2 o 3 pasos dependiendo de espesura, calidad de estación y matorral. Poda alta, desbroce puntual o generalizado.

*Clases naturales de edad (miden el grado de desarrollo de la masa arbolada):* *diseminado* (plántulas recién germinadas hasta los 25 cm de altura), *repoblado*<sup>1</sup> (desde diseminado hasta alcanzar la tangencia de copas o 1,30 m de altura), *monte bravo*<sup>2</sup> (entre el inicio de la tangencia de copa (1,30 m) y el inicio de la poda natural), *latizal*<sup>3</sup> (desde el inicio de la poda natural hasta que su diámetro alcanza 20 cm) y *fustal*<sup>4</sup> (última clase natural de edad que se aplica cuando el diámetro medio supera los 20 cm)

Para masas de regenerado y monte bravo se aplican clareos sistemáticos o semiselectivos, donde se estima conveniente extraer, como media, un 75% del número de pies de forma sistemática.

Si la masa arbolada se encuentra en estado de latizal se pueden aplicar diferentes tratamientos en función de la densidad. En el caso de la zona ámbito del proyecto LIFE, las masas en estado de latizal no cuentan con una densidad muy elevada (250-300 pies/ha), por lo que es recomendable posponer la extracción o aplicar un porcentaje bajo (10%) como medida sanitaria. También es aconsejable aplicar desbroces y labores de eliminación o tratamiento de todos los restos de desrame y descope producidos en las operaciones selvícolas.

Si la masa arbolada está en estado de fustal se pueden aplicar cortas de regeneración mediante aclareo sucesivo en 2 o 3 pasos dependiendo de espesura, calidad de estación y matorral, aunque esta clase natural de edad no está muy presente en la zona.

Para el resto de zonas de pasto, matorral y pasto - matorral, se recomienda la aplicación de desbroces, ya sean de forma manual con moto-desbrozadora; desbroce mecanizado con tractor de cadenas y desbrozadora; desbroce por quema a hecho, también denominada esta operación quema prescrita. En las zonas donde sea adecuada su aplicación por presencia de cabaña ganadera o

reintroducción de este aprovechamiento se está proponiendo el control de biomasa arbustiva mediante ganadería extensiva. Podría tener aplicación más directa al mantenimiento de áreas cortafuegos tras realizar el primer desbroce o quema prescrita.

### **1.3.2. Evaluación de la eficacia preventiva de las actuaciones de gestión**

El uso de los simuladores de incendios aplicados a la evaluación de tratamientos selvícolas pretende cuantificar las diferencias existentes en el comportamiento del fuego entre la masa actual y la masa después de aplicar una serie de tratamientos selvícolas. Los factores a cambiar son el tipo de modelo de combustible y por tanto: los valores de la carga de combustible según el tiempo de retardo (1 hora, 10 horas y 100 horas), cantidad de combustible vivo y muerto, altura de la primera rama viva (CBH, m), Fracción de Cábida Cubierta arbolada y/o Cobertura de matorral (FCC, %) y Densidad Aparente de las copas (CBD, kg/m<sup>3</sup>).

Es imprescindible por tanto caracterizar físicamente el complejo de combustibles en masas forestales, y analizar las modificaciones que se producen en el mismo tras la modificación de su estructura por la ejecución de tratamientos preventivos. Los fundamentos de intervenciones preventivas en las masas forestales para alterar el comportamiento del fuego (Agee *et al.*, 2000) han subrayado la necesidad de afectar con ellos a la estructura completa del complejo de combustibles.

Aunque la mayoría de los estudios sobre esta temática en ecosistemas forestales norteamericanos han evidenciado una reducción en la posibilidad de inicio y propagación de fuego de copa (Stephens y Moghaddas, 2005), otros han mostrado dudas sobre su eficacia, si no se realizan simultáneamente tratamientos de los combustibles de superficie, en su estado natural o modificados por la adición de los restos de los tratamientos al arbolado, (Stephens, 1998).

En el ámbito europeo hay una notable carencia de información sobre esta temática, (Crecente-Campo *et al.* 2009, Jiménez *et al.*, 2013). En combustibles de matorral se ha comprobado la eficacia preventiva de la reducción de la carga de combustibles mediante tratamientos de desbroce y quemas prescritas (Marino *et al.*, 2012) y posterior quema experimental. Este tipo de estudios son escasos y en el caso de masas arbóreas son inexistentes por las dificultades de realizar quemas de campo similares a un incendio de copas. Para ello es imprescindible la herramienta de la simulación, mediante la cual se pueden generar escenarios del comportamiento teórico de un incendio para diferentes condiciones de tratamientos de los combustibles y con ello evaluar la eficacia preventiva de las actuaciones, (Stephens, 1998).

## **1.4. Objetivos**

En el contexto del proyecto *Bioenergy and Fire Prevention* se ha considerado la necesidad de realizar un estudio exhaustivo de las implicaciones de la explotación de biomasa para la prevención de incendios forestales en el área denominada Macizo de Caroig, en el Oeste de la provincia de Valencia. Para abordar este trabajo se han determinado los siguientes objetivos.

Objetivo principal:

Evaluar la eficacia para la prevención de incendios forestales de la gestión de una masa forestal cuyo aprovechamiento principal es la extracción de madera para obtención de biomasa con fines energéticos en el Macizo de Caroig (Valencia).

Objetivos específicos:

## Técnicos:

- Simular el comportamiento del fuego en la masa forestal estudiada y comprobar la efectividad de los diferentes tratamientos selvícolas sobre la masa arbolada y sobre los combustibles para reducir el potencial de comportamiento del fuego.
- Evaluar las salidas en diferentes escenarios de simulación libre para valorar el efecto del tipo de gestión sobre la superficie afectada o intensidad del fuego.
- Utilizar la pertenencia difusa en la red de cortafuegos para proponer mejoras en el diseño de estas infraestructuras y optimización de los tratamientos selvícolas de apertura y mantenimiento.

## Científicos:

- Cuantificar y comparar estadísticamente la eficacia para la prevención de incendios de los escenarios evaluados de extracción de biomasa.
- Proponer elementos para la toma de decisión en la gestión de estas masas que compatibilicen el aprovechamiento de biomasa con fines energéticos y la prevención de incendios.

## Metodológicos:

- Evaluar la validez de FARSITE, Wildfire Analyst y Visual Cardin en las condiciones españolas para simular incendios en diferentes escenarios de gestión de biomasa forestal.
- Exploración de herramientas geo estadísticas para mejora de la información LIDAR, utilización de *Model Builder* de ArcGIS 10 para la automatización de diferentes procesos analíticos.
- Uso de lógica difusa para modelar las redes cortafuegos en función de los modelos de combustible y pendiente del terreno.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Zona de estudio

#### 2.1.1. Localización

La zona de estudio está formada por el Macizo de Caroig (Figura 7). Se localiza en la provincia de Valencia, dentro de la Comunidad Valenciana. Se trata de una superficie de aproximadamente 130541,7 hectáreas en las que se agrupan un total de 18 municipios. Las coordenadas UTM son (665068,57; 4355699,61), (687620,32; 4295207,75), (664680,90; 4354885,73) y (704101,00; 4317277,41).

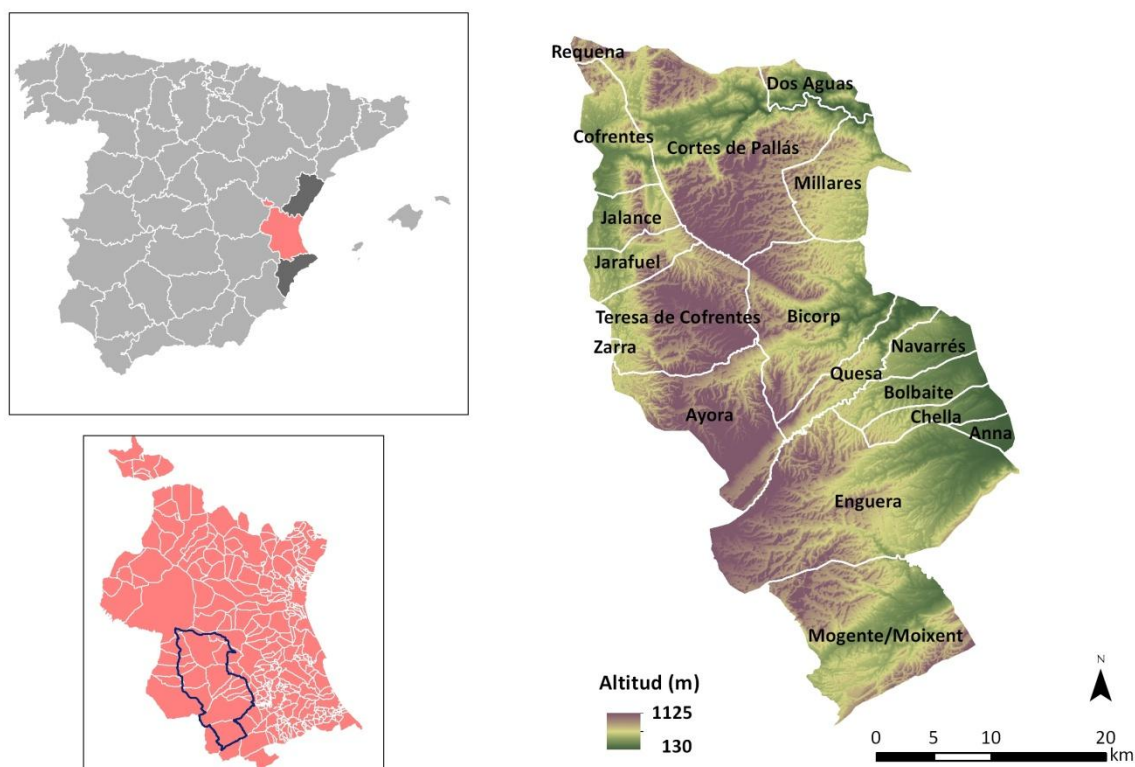


Figura 7. Situación del Macizo de Caroig.

La Tabla 4 resume los principales usos del suelo de la zona según SIOSE 2011. Solo el 2,4% de la superficie de la zona de estudio son zonas artificiales o agua. La masa forestal está compuesta principalmente por *Pinus halepensis*, encinas y restos de cultivos (olivos, almendros y algarrobos)

Tabla 4. Usos del suelo de la zona de estudio según SIOSE 2011. Fuente: IDE Generalitat Valenciana, (<http://terrasit.gva.es/es>).

Descripción		Superficie (ha)	Descripción		Superficie (ha)
<b>Arbolado forestal</b>	Coníferas	24770,60	<b>Coberturas artificiales</b>	Edificación	2,85
	Frondosas	60,04		Equipamiento, dotacional	46,90
<b>Matorral</b>	Matorral	41639,29		Industrial	119,28
<b>Pastizal</b>	Pastizal	42947,51		Infraestructuras	644,29
<b>Cultivos</b>	Cultivos herbáceos	3806,55		Lámina de agua artificial	144,83
	Cultivos leñosos	14125,24		Otras construcciones artificiales	12,28
<b>Zonas naturales sin vegetación</b>	Ramblas	567,40		Primario	50,20
	Roquedo	41,14		Suelo urbanizable no edificado	24,46
	Suelo desnudo	489,24		Suelo urbano mixto	319,77
	Zonas quemadas	64,46		Terciario	50,02
<b>Coberturas de agua</b>	Aguas continentales	598,38		Zona de extracción	16,93

Gran parte del territorio forestal tiene diferentes figuras de protección (Red Natura 2000, LICs, ZEPA), en concreto 80515,2 hectáreas pertenecen a zonas LIC (Lugares de Importancia Comunitaria son todos aquellos ecosistemas protegidos con objeto de contribuir a garantizar la biodiversidad mediante la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres) y 86940,8 hectáreas de zonas ZEPA (Zona de Especial Protección para las Aves).

Los modelos de combustible presentes en la zona de estudio se detallan en la Tabla 5.

Tabla 5. Superficie ocupada por cada modelo de combustible y su porcentaje respecto a la superficie total de la zona de estudio.

	Modelos de combustible	Superficie (ha)	% de superficie
<b>Pastizal</b>	<b>P1</b>	179,77	0,14
	<b>P2</b>	88,70	0,07
	<b>P3</b>	116,81	0,09
<b>Pastizal- matorral</b>	<b>PM1</b>	4823,36	3,69
	<b>PM2</b>	650,31	0,50
<b>Matorral</b>	<b>M1</b>	207,23	0,16
	<b>M2</b>	40209,49	30,80
	<b>M3</b>	2357,89	1,81
<b>Matorral bajo arbolado</b>	<b>MA1</b>	10505,29	8,05
	<b>MA2</b>	26892,36	20,60
	<b>MA3</b>	20940,41	16,04
	<b>MA4</b>	739,43	0,57
<b>Hojarasca bajo arbolado</b>	<b>HA</b>	6,92	0,01
<b>No combustibles</b>	<b>Artificial</b>	607,72	0,47
	<b>Agrícola</b>	20410,75	15,64
	<b>Arena</b>	10,83	0,01
	<b>Agua</b>	1252,24	0,96
	<b>Minas</b>	75,24	0,06
	<b>Ribera</b>	16,43	0,01
	<b>Vías 1</b>	51,12	0,04
	<b>Vías 2</b>	398,06	0,30
	<b>Zonas verdes</b>	1,32	0,00

### 2.1.2. Régimen de incendios

La estadística de incendios forestales de la demarcación del periodo 1969-2012 refleja que el 75% de las incidencias corresponde a conatos (incendios menores de 1 hectárea). En cuanto a la superficie afectada por incendios forestales, cabe destacar que la mayor parte de ésta corresponde a unos pocos incendios mayores de 500 hectáreas denominados Grandes Incendios Forestales (GIF).

Teniendo en cuenta las superficies quemadas que se encuentran dentro de la delimitación del área de interés, más del 100% de la superficie ha sido quemada en algún año, y aunque no quiere decir que se haya quemado toda su extensión, existen zonas que han sido incendiadas varias veces, lo que da una idea de recurrencia de incendios en algunas zonas (Tabla 6). Como se observa en la Figura 8, en la parte noreste, se han ocasionado varios grandes incendios.

Tabla 6. Superficie (ha) y número de incendios forestales por año en el macizo de Caroig.

AÑO	NÚMERO	SUPERFICIE (ha)	AÑO	NÚMERO	SUPERFICIE (ha)
1969	1	671,29	2001	35	40,85
1979	1	38901,13	2002	17	5,23
1985	4	22501,48	2003	28	19,64
1993	15	10120,54	2004	27	9,74
1994	18	50047,45	2005	37	11,89
1995	8	74,60	2006	22	35,78
1996	18	273,54	2007	7	1,67
1997	16	5,16	2008	18	79,15
1998	29	30,46	2009	31	13,42
1999	32	3193,42	2010	15	3,27
2000	18	222,39	2012	1	26328,66

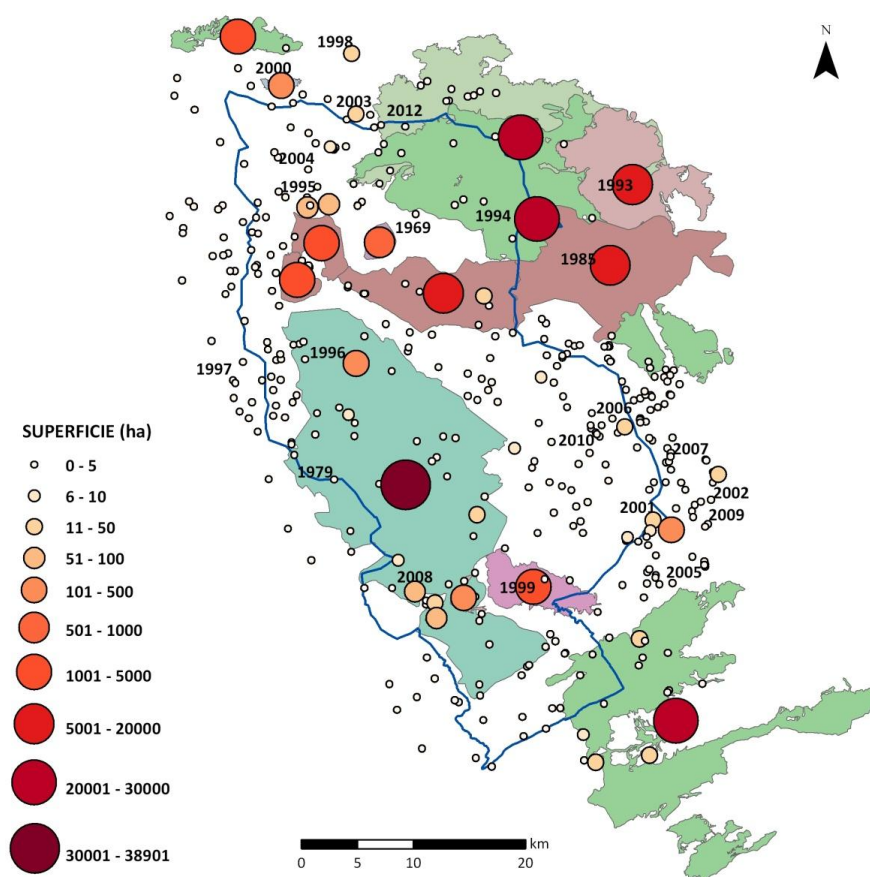


Figura 8. Régimen de incendios en el macizo de Caroig. Se indican el número total de incendios y la superficie afectada en el período considerado (1969-2012).

### 2.1.3. Plan de prevención de incendios

La totalidad de los terrenos forestales de la Comunidad Valenciana tienen la consideración de “zonas de alto riesgo de incendios forestales” según la resolución de 19 de julio de 2005, (DOGV 5062/2005).

En lo referente a la gestión forestal, la Comunidad Valenciana está dividida en once demarcaciones, según la ley forestal de la Generalitat Valenciana, (BOE 3/1993). El macizo de Caroig es un área comprendida entre las demarcaciones de Xàtiva, Requena y Lliria de alto interés para el proyecto *Bioenergy and Fire Prevention*, debido a que presenta gran cantidad de superficie forestal sin explotación que se considera interesante para su aprovechamiento energético. Se dispone del Plan de Prevención de Incendios Forestales de la Demarcación de Xàtiva, (Generalitat Valenciana, 2009). El objeto general del plan es minimizar el número de incendios forestales, así como la superficie afectada por incendios en caso de producirse. El ámbito territorial de aplicación del plan son aquellos terrenos forestales incluidos en la demarcación forestal de Xàtiva y aquellos terrenos lindantes al forestal sobre los cuales la normativa vigente o el propio plan establezcan medidas de prevención. Las demarcaciones colindantes, Requena y Lliria, no disponen de plan propio, por lo que el Plan de Xàtiva se va a hacer extensivo a toda la delimitación del macizo de Caroig (Figura 9).



Figura 9. Demarcaciones forestales de la Comunidad Valenciana.

La probabilidad de que se produzca un GIF aumenta cuando se dan condiciones meteorológicas adversas (que pueden concretarse fundamentalmente en: alta temperatura, baja humedad relativa y



alta velocidad del viento), además, la peligrosidad del incendio viene determinada por las características topográficas de la zona, así como por las características del combustible.

Tanto la acumulación de biomasa como la desaparición de zonas de discontinuidad suponen un cambio en la estructura de los sistemas forestales que provoca un aumento de la peligrosidad de los incendios, superando en ocasiones la capacidad de los medios de extinción para controlar el incendio. Ante esta problemática, dentro de las líneas de actuación que forman parte de este plan, está la construcción o conservación de Áreas Cortafuegos.

El dimensionamiento de los elementos de ruptura se hace en función de la longitud de llama prevista, de acuerdo con los modelos de combustible presentes en cada zona y para unas condiciones meteorológicas características en los días de máximo riesgo.

## **2.2. Simulaciones de grandes incendios con FARSITE**

El simulador elegido para la realización de este trabajo es FARSITE debido a la cantidad de bibliografía existente y por los detalles vistos en las Figuras 5 y 6. En el caso de Wildfire Analyst (Figura 5) se observa una sobreestimación en la superficie simulada de incendio para un mismo punto comparada con FARSITE. En el caso de Visual-Cardin (Figura 6) ocurre lo contrario, simula menos superficie que FARSITE.

### **2.2.1. Generación de puntos de inicio de incendios**

Se determinó realizar un número total de 40 simulaciones en el área de estudio para tener una muestra representativa del comportamiento del fuego en el territorio. No son puntos de ignición colocados al azar ya que se contaba con el riesgo de que esos puntos no demuestren la realidad que se quiere observar. Los puntos se establecieron de manera estratificada ponderando el número de igniciones en cada modelo de combustible en función de la superficie que ocupan los diferentes tipos de modelos de combustible. Los puntos se concentraron mayoritariamente en el extremo Este de la zona de estudio, debido a los vientos dominantes en condiciones de disponibilidad de los combustibles para arder son de componente Este-Oeste (vientos terrales muy secos procedentes del Sistema Ibérico). Este vector de viento dominante es el que se utiliza en las simulaciones, y la ubicación de puntos de ignición en la zona Oeste permite asegurar que el perímetro del área incendiada no exceda los límites del macizo de Caroig (Figura 10).

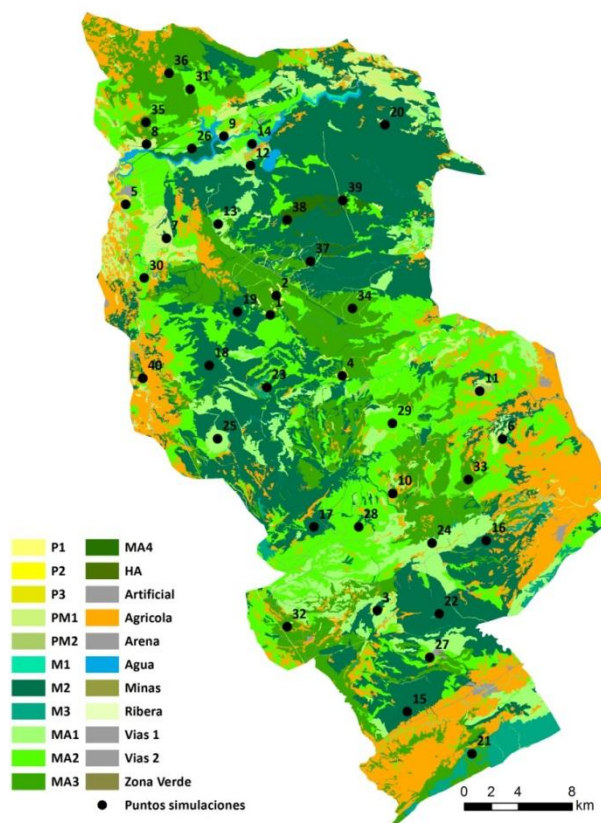


Figura 10. Puntos creados para la realización de las simulaciones localizados en el Macizo de Caroig.

### 2.2.2. Fuentes de datos, información geográfica y variables consideradas

Las simulaciones en FARSITE (Figura 11) requieren un conjunto de información espacial de los principales factores que afectan al comportamiento del fuego: topografía, vegetación y meteorología. Todas las capas de entrada se introducen en formato ASCII y con igual extensión, sistema de coordenadas y tamaño de celda. Para este proyecto se adopta 30 m de tamaño de celda y sistema de coordenadas ETRS\_1989\_UTM\_Zone\_30N. Este apartado se detalla en función de los datos de entrada, ajustes del programa y datos de salida que aporta FARSITE.

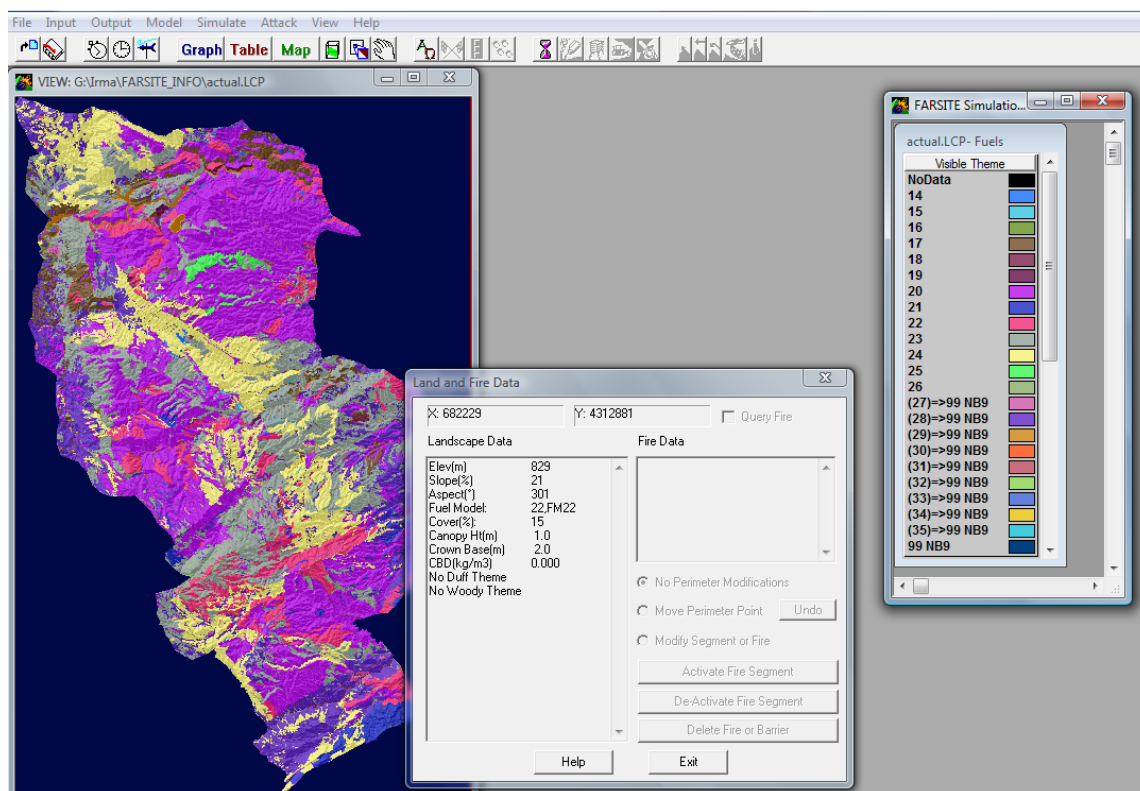


Figura 11. Ventana de FARSITE.

### 2.2.2.1. Datos de entrada (Inputs)

Para la correcta realización de las simulaciones, FARSITE necesita una serie de información que coincide con los tres factores que forman el triángulo del fuego (topografía, combustibles y meteorología).

#### 1. Elevación

La capa de **elevation** o **elevación**, expresada en metros, proviene de la página del IGN (Instituto Geográfico Nacional). Se obtuvo mediante sensores LIDAR con una densidad media de 0,5 puntos/m<sup>2</sup>. Su resolución es de 5 m, (<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/buscadorCatalogo.do>).

#### 2. Pendientes y Orientaciones

La capa de **slope** o **pendientes** (%) y **aspect** u **orientaciones** (grados) son derivadas de la capa de elevaciones, elaboradas mediante procesos *Slope* y *Aspect*, realizados en ArcGIS 10.

#### 3. Modelos de combustible

La capa de **fuel model** o **modelos de combustible** fue proporcionada por el Consorcio de Bomberos de Valencia. Los parámetros que caracterizan los modelos de combustible se personalizan con la herramienta NWMDL de BehavePlus<sup>®</sup> ([www.fire.org](http://www.fire.org)) ya que no coinciden con ninguno de los modelos, Rothermel o Scott y Burgan, con los que trabaja FARSITE por defecto.

#### 4. Cubierta vegetal

La información que contiene la capa **canopy cover** o **cubierta vegetal** en % y **stand height** o **alturas** es información obtenida del proyecto LIFE+, procedente de datos LIDAR derivados de los vuelos LIDAR del PNOA con una resolución de 0,5 puntos/m<sup>2</sup>.

La capa **cubierta vegetal** que corresponde con la FCC (Fracción de cabida cubierta %) y la de **alturas (m)**, se refieren solo a masas arboladas, por lo que solo es para los modelos MA1, MA2, MA3, MA4 y HA (ver Tabla 5). Estos modelos se tratan como capas separadas mediante la herramienta *Extract by Mask*. El resto de modelos contiene valor 0.

Para poder ordenar y sistematizar el proceso, se realiza un modelo con la herramienta *Model Builder* en ArcGIS 10 con el fin de obtener la capa de cubiertas vegetales en porcentaje y convertida a formato ASCII (Figura 12).

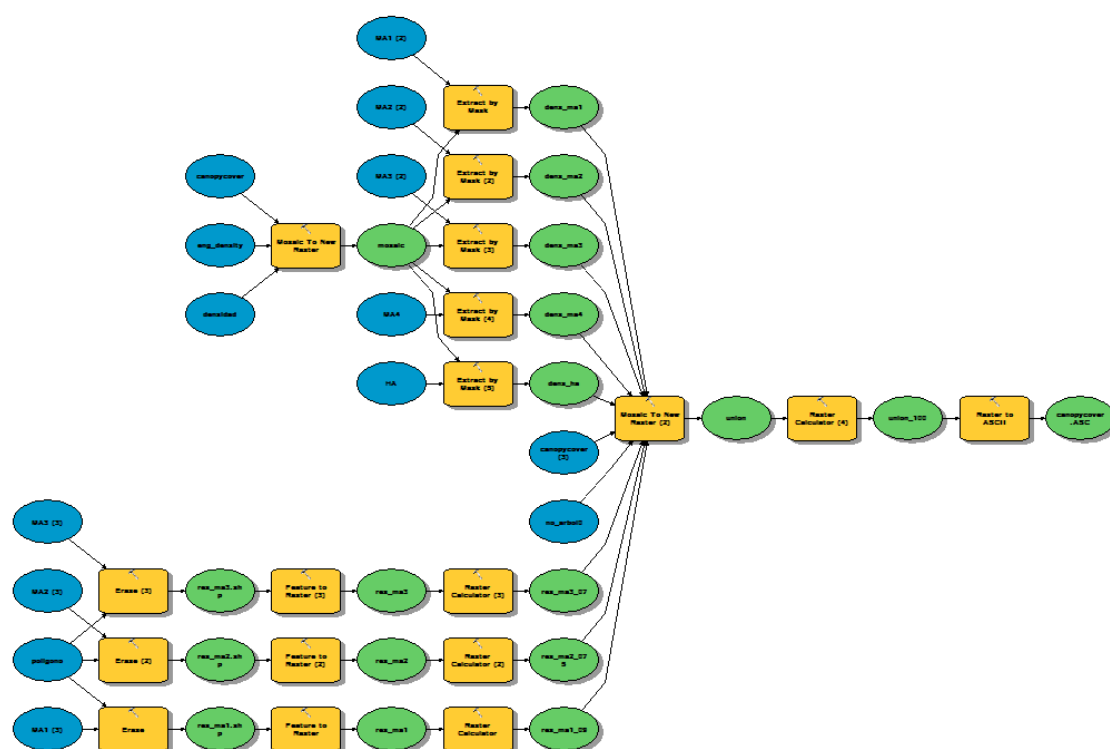


Figura 12. *Model Builder* elaborado para la organización del proceso de realización de la capa de cubierta vegetal.

#### 5. Altura de arbolado

Se realiza también un *Model Builder* en ArcGIS 10 con el fin de obtener la capa de alturas en metros en números enteros multiplicados por 10, para poder considerar los decimales y convertida a formato ASCII (Figura 13). Se considera que la masa está dominada por *Pinus halepensis* (pino carrasco) en diversas clases naturales de edad (regenerado, monte bravo, latizal o fustal). La mayoría de la superficie afectada por incendios presentan masas en estado de regenerado, monte bravo con mezcla de matorral (modelos de combustible MA1, MA2, MA3). En el caso en que el pino no haya regenerado las áreas han sido ocupadas por matorral o mezclas de matorral y pasto (modelos PM y M). Las áreas no afectadas por grandes incendios presentan latizales y fustales de diversas

densidades y alturas casi siempre con matorral bajo copas (modelo MA4) y ocasionalmente sin matorral (modelo HA).

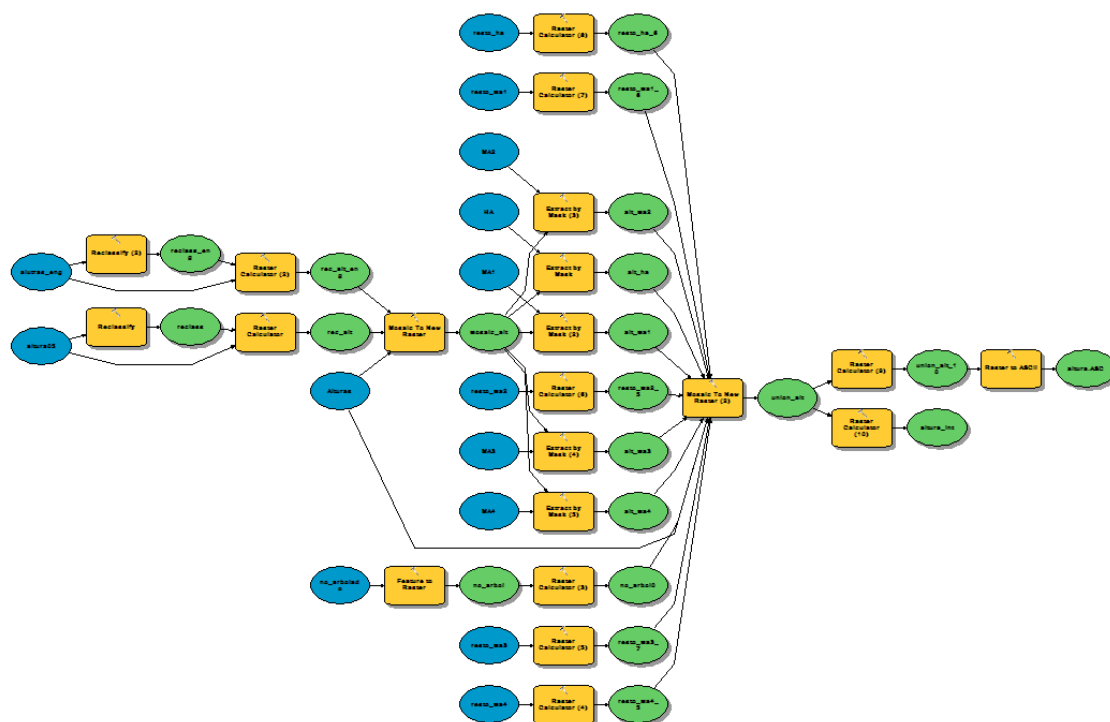


Figura 13. *Model Builder* elaborado para la organización del proceso de realización de la capa de alturas.

#### 6. Altura desde superficie del suelo hasta primera rama viva

**Crown Base Height (CBH)** es la altura desde la superficie del suelo hasta la primera rama viva en metros. Según los datos observados en el inventario de campo suministrados por el proyecto *Bioenergy and Fire Prevention* se puede considerar contante y se asignará una altura media de 2 metros.

#### 7. Densidad aparente

Para calcular la capa de **Crown Bulk Density (CBD)** o **densidad aparente de las copas**, se necesita la capa de alturas, anteriormente calculada. Con los datos de inventario de campo se establece un ajuste de regresión entre las alturas y los diámetros de la masa (Figura 14).

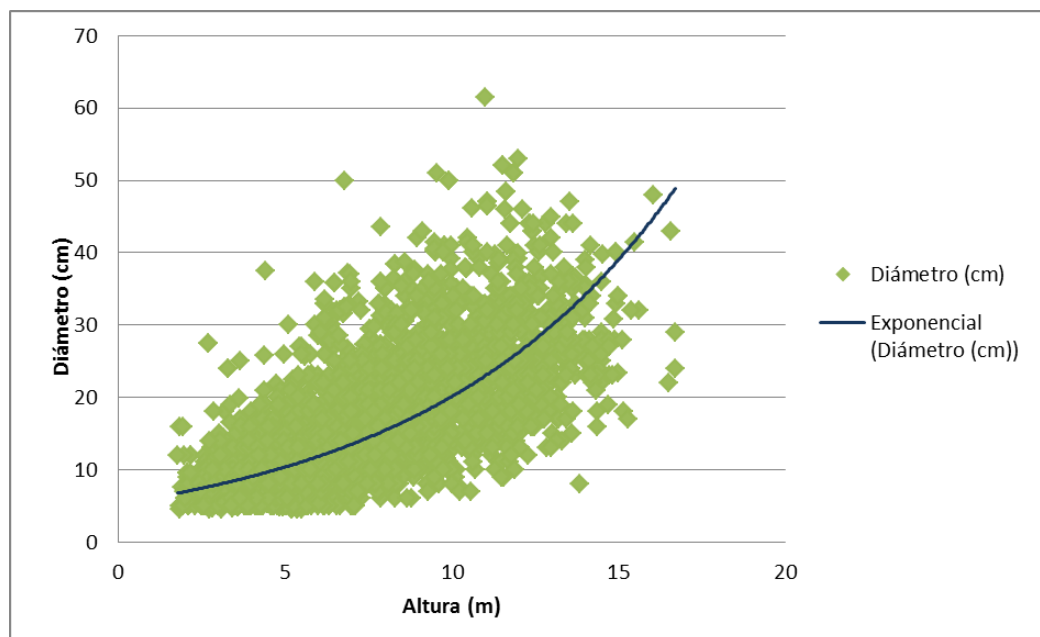


Figura 14. Relación exponencial existente entre los datos de altura y diámetro (N=3521).

El modelo que mejor representa esta relación es la función exponencial:

$$y = 5,3487e^{0,1324x}$$

Con ( $R^2=0,52$ ), siendo: y = diámetro normal (cm), x = altura (m)

Una vez que se expresan los diámetros en función de las alturas, usando la monografía nº 13 del INIA se pueden aplicar funciones de regresión que relacionan el peso seco de las diferentes fracciones de copa (kg) con su diámetro normal (cm), (Montero *et al.*, 2005). Para el cálculo de la biomasa se consideran los parámetros para acículas y las ramillas finas, hasta 6 mm de diámetro (1 hora de tiempo de retardo), como combustible arbóreo disponible para el frente de llama. La función exponencial se aplica mediante *Raster Calculator*.

El siguiente paso es calcular los valores de:

$$CF = e^{\frac{SEE^2}{2}}$$

donde: CF: Factor de corrección, SEE: error estándar de la estimación (ver valor en Tabla7)

$$A = e^a$$

a: parámetro a (valor en Tabla 7)

Se calcula la siguiente ecuación, donde el valor de “d” será el ráster de diámetros en función de alturas calculado y “b” el ráster resultado de biomasa (kg). También se realiza mediante *Raster Calculator*.

$$\ln b = a + b \cdot \ln d$$

$$b = CF \cdot A \cdot d^b$$

Tabla 7. Parámetros necesarios para el cálculo de la biomasa.

Y	Parámetros		R <sup>2</sup> adj	SEE
	a	b		
Biomasa de ramas de diámetro menor de 2 cm	-2,74498	2,03748	0,953	0,226267

Se realiza un *Model Builder* en ArcGIS 10 para poder ordenar todos los pasos necesarios (Figura 15).

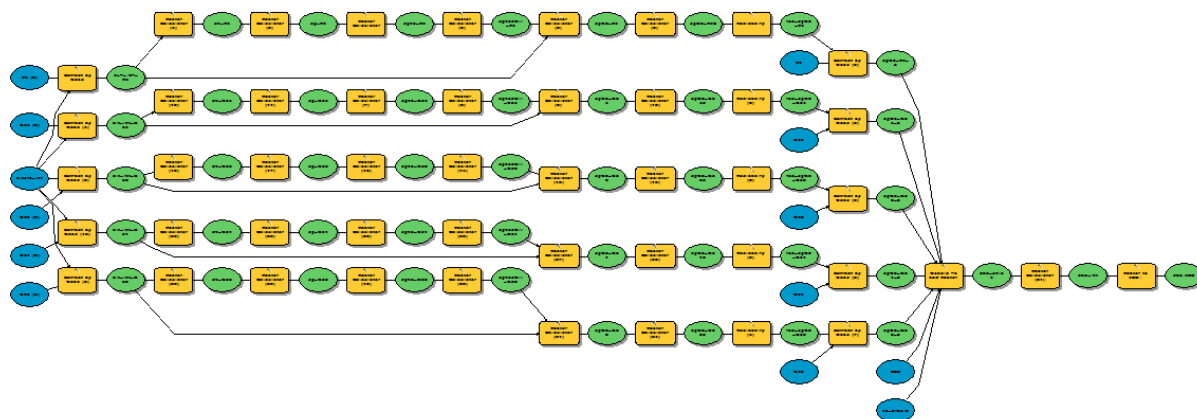


Figura 15. *Model Builder* elaborado para la organización del proceso de realización de la capa de densidad aparente.

El volumen de copa se calcula como el volumen de un paralelepípedo de altura igual a la longitud media de copa. La longitud media de copa se calcula como la diferencia entre la altura media de la masa y la altura media de la base de la copa, (Fernández-Alonso *et al.*, 2013). Todas las operaciones son realizadas mediante *Raster Calculator*. Finalmente la densidad aparente se expresa en kg/m<sup>3</sup> multiplicado por 100, para considerar los decimales y se convierte a formato ASCII.

En la Figura 16 se puede ver la ventana donde se introducen los archivos de entrada explicados hasta ahora.

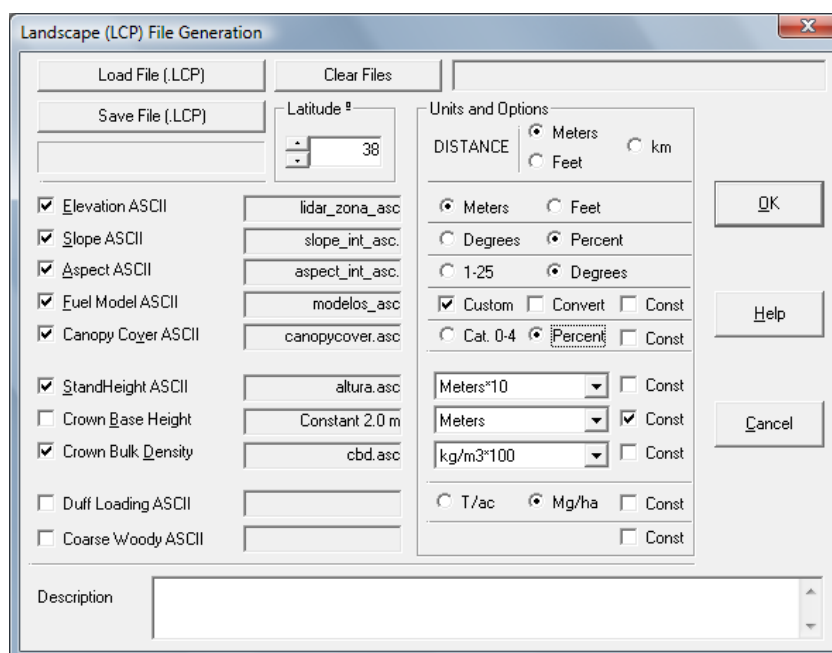


Figura 16. Ventana en la que se introducen los archivos de entrada en formato ASCII para la creación del paisaje.

#### 8. Ajustes

**Adjustements** o **ajustes**, este factor cambia el valor de la tasa de propagación. Para este proyecto no se requiere este cambio, por lo que su valor es 1.

#### 9. Datos de Humedad de los combustibles

**Moistures** o **Humedades** para cada modelo (FMC), que en este caso se consideraran constantes para todos los modelos simulando una situación meteorológica extrema en la que los combustibles muertos tienen muy baja FMC.

Tabla 8. Datos de la humedad de los combustibles.

Modelo	1 hora	10 horas	100 horas	Vivo Herbáceo	Vivo Leñoso
Todos	3	5	7	5	50

#### 10. Personalización de los modelos

En la Tabla 9 se describen los valores de las variables descriptivas de los **modelos de combustible** propuestos por el Consorcio de Bomberos de Valencia. Como FARSITE no dispone por defecto de estos modelos es necesario generarlos manualmente para que el sistema pueda leer los ficheros de combustible y generar el correspondiente archivo de combustibles en formato ASCII.

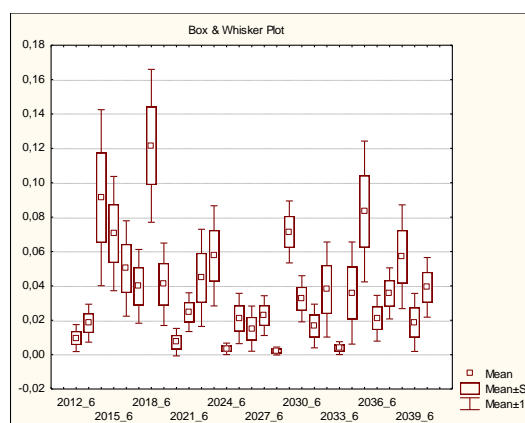
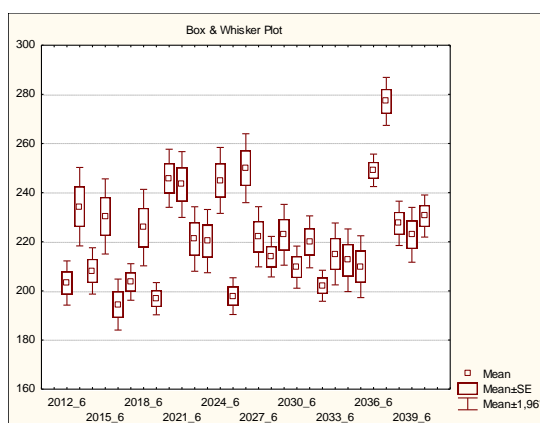


Tabla 9. Caracterización modelos de combustible.

	1h	10h	100h	Vivo herbáceo	Vivo leñoso	1h SAV	Vivo herbáceo SAV	Vivo leñoso SAV	Espesor capa de combustible	Humedad	Calor (vivo)	Calor (muerto)
	t/acre						1/pie		pie	%	BTU/lb	
P1	0,500	0,000	0,000	0,000	0,000	2750	1800	1500	1,000	14	8000	8000
P2	0,470	0,000	0,000	0,200	0,000	2750	1800	1500	3,000	14	8000	8000
P3	1,700	0,910	0,000	8,210	0,000	1800	1500	1500	10,000	29	8813	8813
PM1	0,680	0,000	0,000	0,940	0,000	1800	1600	1800	2,000	25	8000	8000
PM2	1,720	0,270	0,090	3,080	6,440	1800	1600	1600	5,000	40	8000	8000
M1	0,510	0,410	0,000	0,000	0,840	2000	1800	1500	1,000	20	8813	8813
M2	0,630	0,650	0,000	0,000	1,630	2000	1800	1500	3,000	32	8813	8813
M3	0,730	0,880	0,000	0,000	2,490	2000	1800	1500	5,000	40	8000	8000
MA1	1,090	2,070	1,820	1,970	4,560	1750	109	1600	6,000	38	8000	8000
MA2	1,030	1,700	1,370	0,000	0,340	1750	1800	1600	2,000	33	8000	8000
MA3	1,030	1,700	2,720	0,000	0,340	1750	1800	1500	5,000	25	8000	8000
MA4	2,740	1,820	4,540	0,000	1,820	1800	1800	1500	1,000	25	8000	8000
HA	1,360	0,910	2,270	0,000	0,000	2500	1800	1600	1,000	29	8000	8000

## 11. Meteorología

El escenario meteorológico considerado es el del incendio de Cortés de Pallás (municipio de Valencia) en 2012 suministrado por el Consorcio de Bomberos de Valencia. Este incendio comenzó el 28 de junio de 2012 y afectó a 48000 hectáreas. La elección se justifica debido a que es un suceso desfavorable en cuanto a temperaturas altas y humedades relativas bajas. Dentro de las predicciones realizadas por AEMET se analiza la tendencia de 2011 a 2040, en la cuadrícula que enmarca la zona de estudio, para comprobar si estas condiciones se van a repetir en el futuro contexto de cambio climático. La Figura 17 muestra, un análisis de varianza no paramétrico utilizando el test de Coeficiente de Concordancia de Kendall (*Friedman ANOVA and Kendall Coeff. of Concordance*) de las temperaturas máximas según el modelo de predicción CGCM2 y para el coeficiente de sequía (precipitación/ 2 veces la temperatura) según el modelo ECHAM4, para los meses con más riesgo de incendio: junio, julio y agosto.



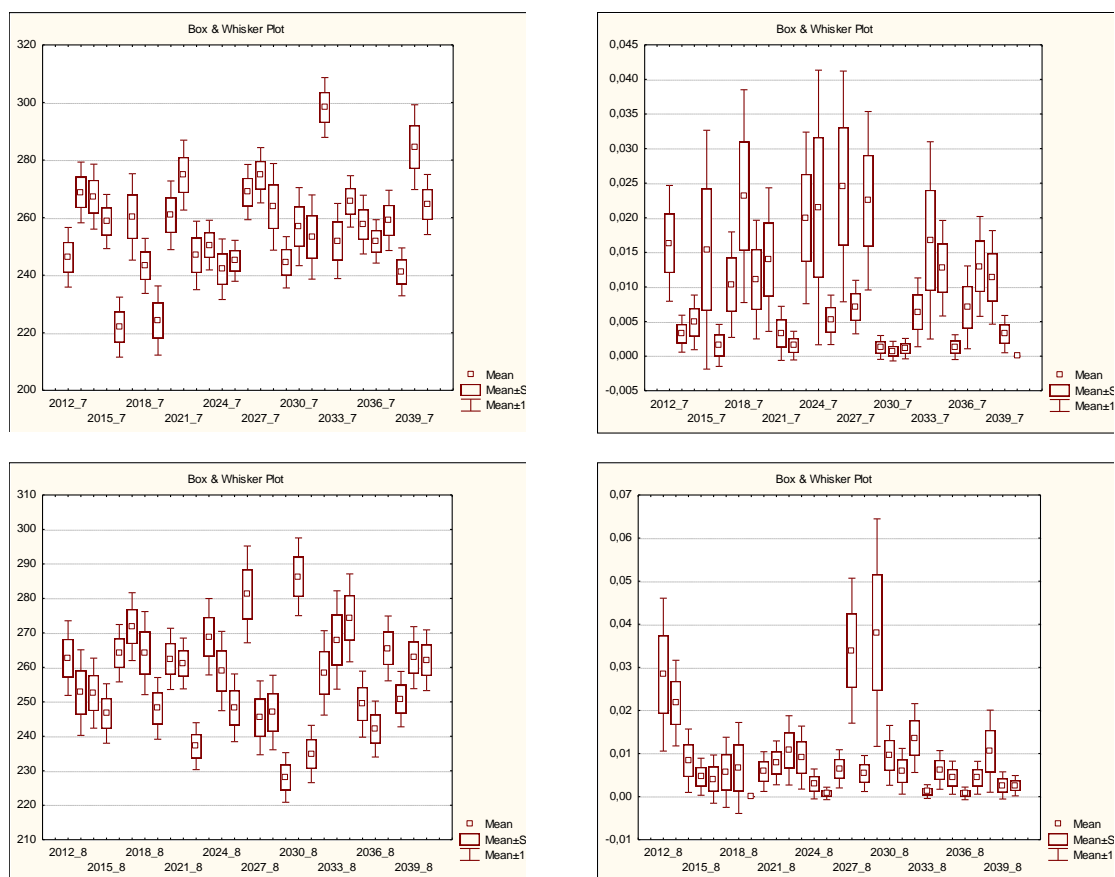


Figura 17. Distintos gráficos que expresan la tendencia global de las temperaturas máximas (izquierda) y del índice de sequía ( $P/2T$ , P: Precipitación (mm), T: Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )) (derecha) de 2011 a 2040 para los meses de junio, julio y agosto.

Analizando el mes de junio, 2012 forma parte de los años más bajos tanto en temperaturas como en niveles de sequía. Por tanto el escenario del 29 de junio del incendio de Cortés de Pallás (ver datos en Figura 18) es un escenario extremo, que con mucha probabilidad se va a volver a repetir incluso se podrían encontrar situaciones más extremas según las predicciones de los modelos climáticos analizados.

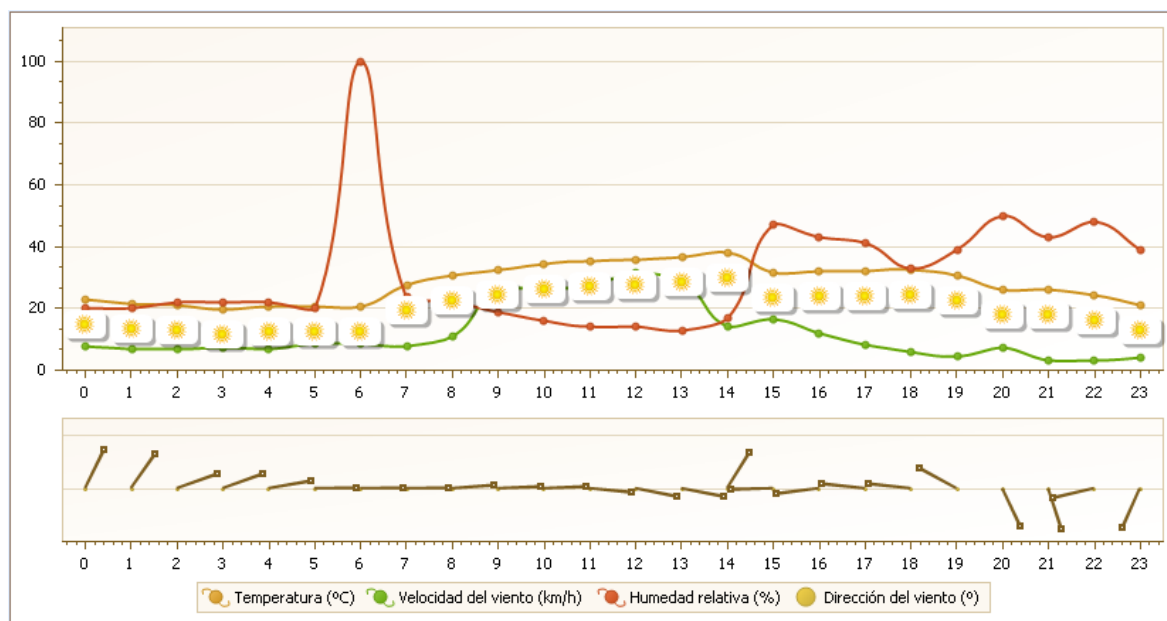


Figura 18. Datos meteorológicos del incendio de Cortes de Pallás utilizados para realizar las simulaciones en el macizo de Caroig.

El archivo necesario para FARSITE necesita datos de: precipitación, hora de la mínima temperatura, hora de la máxima temperatura, temperatura mínima, temperatura máxima, humedad relativa mínima, humedad relativa máxima, elevación (Tabla 10).

Tabla 10. Datos de meteorología.

Día	Precipitación (pulgadas)	Hora (mín)	Hora (máx)	Tª mín (F)	Tª máx (F)	Humedad máx(%)	Humedad mín (%)	Elevación (pies)
28/06	0	23:00	16:00	83	98	21	11	1947
29/06	0	3:00	14:00	67	101	50	13	1947

## 12. Viento

Los datos necesarios para el archivo del viento son: velocidad del viento, dirección y si esta nublado o no. Se usaron los datos del incendio de Cortes de Pallás (Tabla 11).

Tabla 11. Datos de velocidad del viento y dirección a cada hora.

Hora	Velocidad del viento (km/h)	Dirección (°)	Nublado	Hora	Velocidad del viento (km/h)	Dirección (°)	Nublado
0:00	7,57	206	0	12:00	31,428	280,3	0
1:00	7	215	0	13:00	28,872	280,4	0
2:00	7,05	250	0	14:00	14,328	212,1	0
3:00	7,2	250	0	15:00	16,632	88,1	0
4:00	7	260	0	16:00	12,132	82,8	0
5:00	8,5	270	0	17:00	8,388	95,3	0
6:00	8,5	270	0	18:00	5,904	95,3	0
7:00	8	270	0	19:00	4,428	118	0
8:00	11	266	0	20:00	7,236	334,7	0
9:00	25,92	267,4	0	21:00	3,42	341,5	0
10:00	26,46	267,6	0	22:00	3,24	76,9	0
11:00	27,396	274,8	0	23:00	4,284	23,38	0

Tanto para el archivo de meteorología como el de viento, necesita datos del día anterior a la simulación que sirvan de antecedentes y para el cálculo de acondicionamiento de los combustibles muertos.

Para finalizar la creación del proyecto se deben meter los archivos meteorológicos, de viento, los ajustes y personalizaciones necesarias en los modelos de combustible, junto con el paisaje en otra ventana de FARSITE (Figura 19). En la Figura 20 se muestra un resumen de las capas de información geográfica utilizadas como inputs.

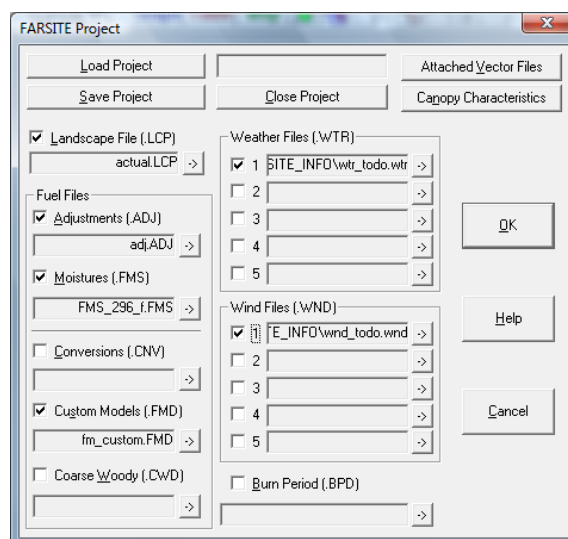


Figura 19. Datos de entrada necesarios para la creación del proyecto.

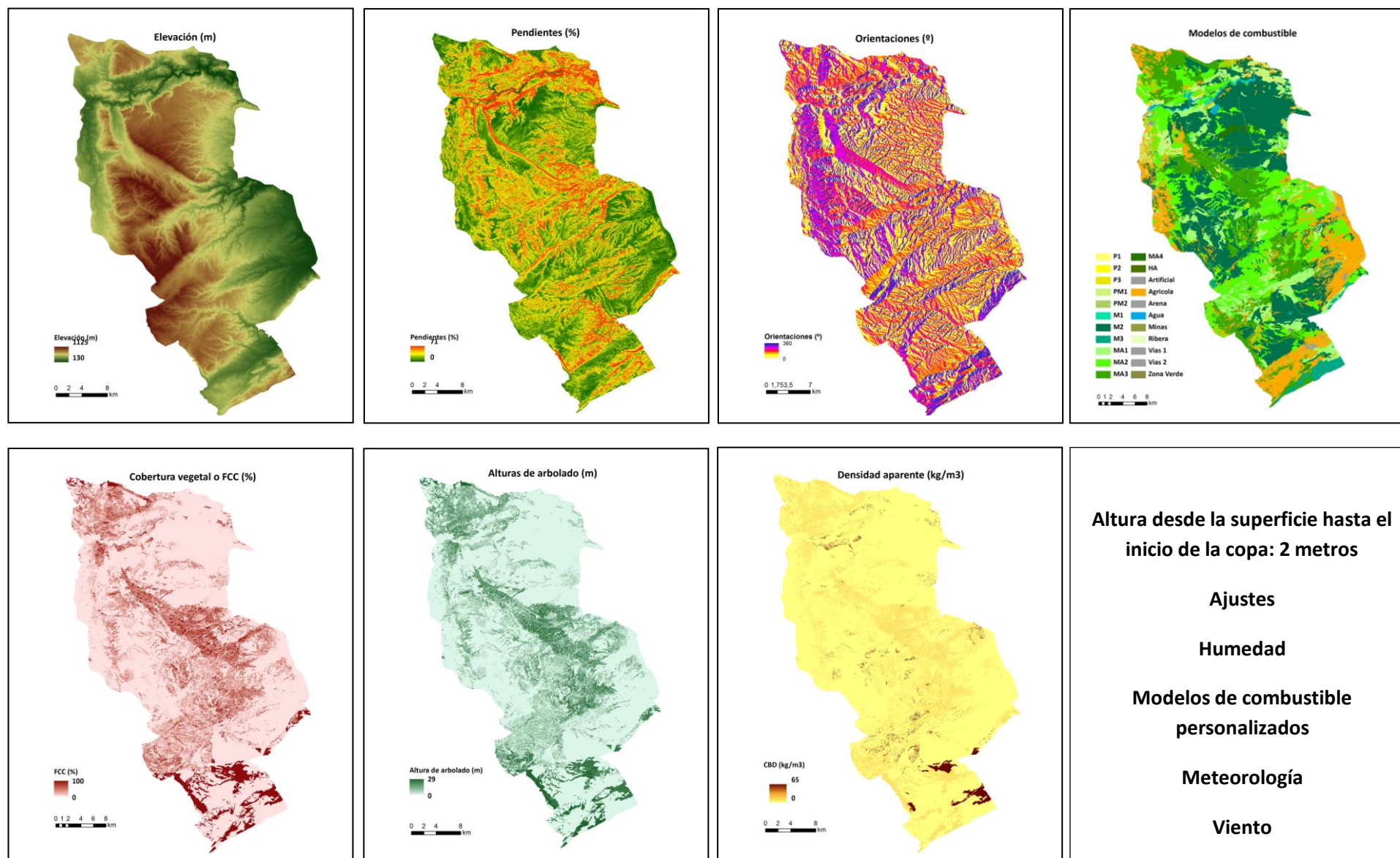


Figura 20. Datos de entrada necesarios para crear el proyecto en FARSITE. Elevación (MDT05 descargado del IGN), Pendientes y Orientaciones (derivados del mapa de elevaciones en ArcGIS 10), Modelos de combustible (Consortio de bomberos de Valencia), Cobertura vegetal y Altura de arbolado (procedentes de *Model Buidar* Figura 12 y 13 con datos LIDAR), Densidad aparente (realizada mediante *Model Buidar* Figura 15 a partir de alturas de arbolado), Altura de la superficie hasta inicio de copa (inventario forestal), Ajustes, Humedad, Personalización Modelos de combustible, Meteorología y Viento (Consortio de Bomberos de Valencia, ficheros FARSITE, elaboración propia).

### 2.2.2.2. Ajustes

Antes de iniciar la simulación y después de crear el proyecto en FARSITE con todos los datos de entrada, se ajustan los siguientes parámetros:

- Parámetros: tiempo en el que se toman los datos de salida. En este caso 30 minutos.
- Fire behavior Options u opciones de comportamiento del fuego: conjunto de herramientas para seleccionar el comportamiento del fuego. Para simular el fuego de subida a copas, se selecciona *Link Crown Density & Cover* en la ventana de opciones de comportamiento del fuego de FARSITE (Figura 21).

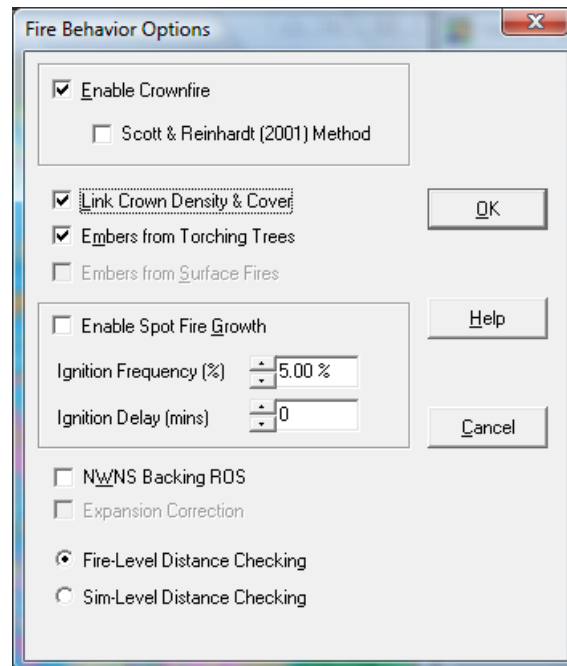


Figura 21. Ventana de FARSITE donde se seleccionan las opciones de comportamiento del fuego.

- Duración de la simulación: El escenario tiene un temperatura máxima de 38,11 °C a las 14 horas, a partir de esa hora baja y tiende a ser constante, por ello se escogió como duración de la simulación, desde 2 horas antes del suceso máximo 12h hasta las 18h, en total 6 horas de simulación libre (Figura 22).

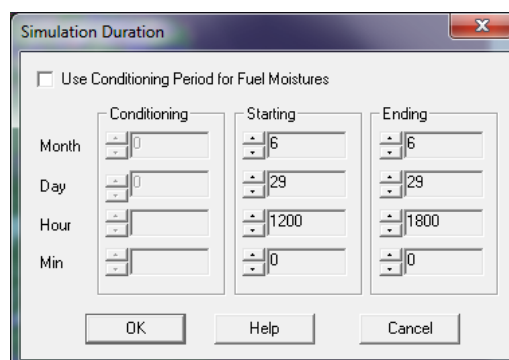


Figura 22. Ventana de FARSITE donde se selecciona la duración de la simulación (mes, día y hora del comienzo y del fin de la simulación).

### 2.2.2.3. Datos de salida (Outputs)

Todas las simulaciones realizadas con FARSITE pueden ser exportadas y gestionadas usando un SIG, algunas en formato vectorial y otras en formato ráster. Las salidas que ofrece FARSITE constan de:

- Perímetro del área quemada en formato vectorial
- Archivos ráster: los archivos ráster se guardan con esas extensiones y para trabajar con los datos, se debe pasar a formato ASCII y a ráster para obtener de cada simulación, la siguiente información detallada en la Tabla 12. En la Figura 23 se observa la ventana de FARSITE en la que se indican los datos que se deseen obtener.

Tabla 12. Descripción de los archivos ráster de salida con sus extensiones y unidades.

Archivo de salida	Descripción	Extensión	Unidades
<b>Intensidad de llama</b>	Velocidad de liberación de la energía producida	.FLI	kW/m
<b>Longitud de llama</b>	Máxima distancia existente entre la base y la punta de la llama	.FML	M
<b>Velocidad de propagación</b>	Velocidad de avance del frente hacia delante, hacia atrás o en los flancos	.ROS	m/min
<b>Calor por unidad de área</b>	Calor generado por unidad de superficie	.HPA	kJ/m <sup>2</sup>
<b>Intensidad de reacción</b>	Tasa de energía liberada definida por Rothermel	.RCI	kW/m <sup>2</sup>
<b>Subida a copa</b>	Probabilidad de subida a copa según modelo de Van Wagner	.CFR	1= fuego de superficie, 2=pasivo, 3=activo
<b>Tiempo de llegada</b>	Tiempo de llegada de los frentes según los parámetros fijados	.TOA	horas
<b>Dirección de la propagación</b>	Rumbo dominante del frente principal de la propagación	.SDR	0 - 359° Azimuth

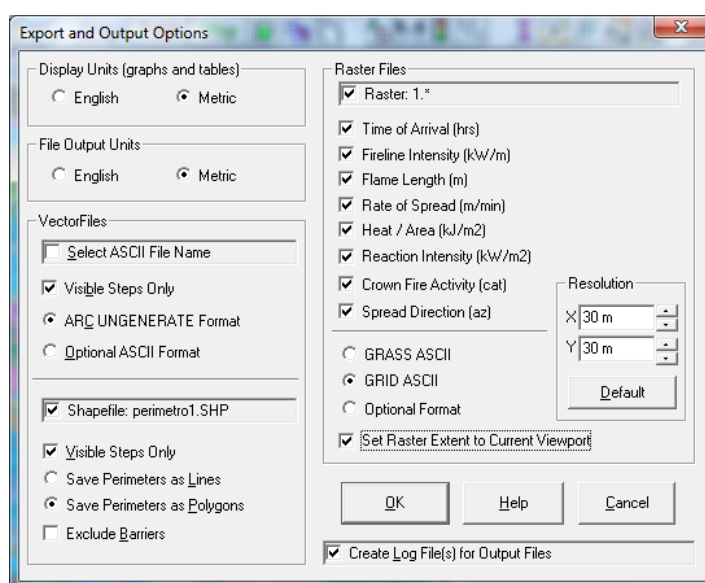


Figura 23. Ventana de FARSITE donde se seleccionan los datos para exportar a ArcGIS 10.



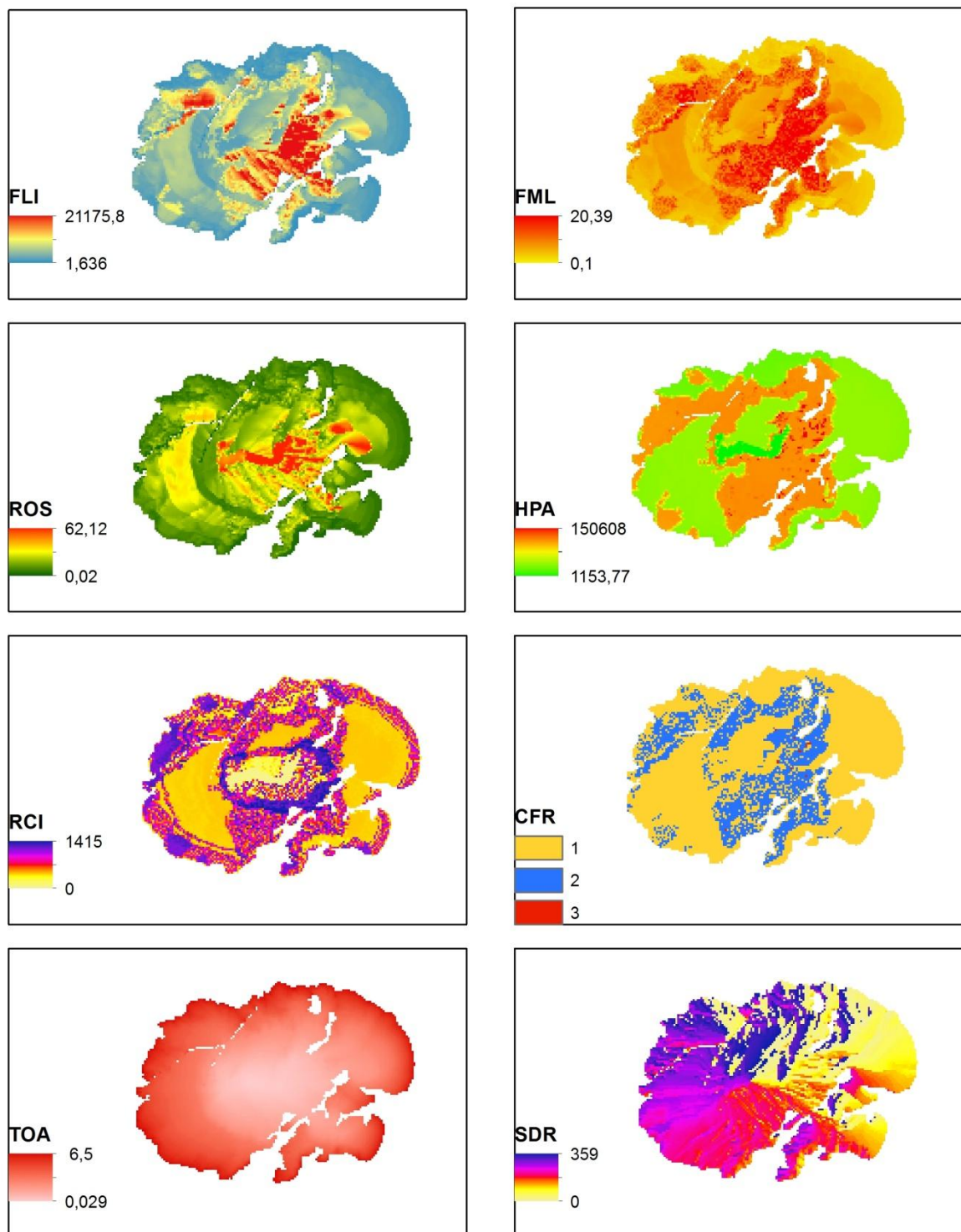


Figura 24. Diferentes ráster de salida para un mismo punto de simulación libre en el escenario actual de modelos de combustible. FLI(Intensidad del frente de llama), FML (Longitud de llama), ROS (Velocidad de propagación), HPA (Calor por unidad de superficie), RCI (Intensidad de reacción), CFR (Subida a copa), TOA (Tiempo de Llegada), SDR(Dirección de la propagación).



- Datos de área y perímetro en función del tiempo establecido en el apartado Parámetros (30 minutos), tanto en gráficas como en tablas. Se recopilaron los valores medios, máximos y desviaciones estándar de todas las simulaciones (Figura 25).

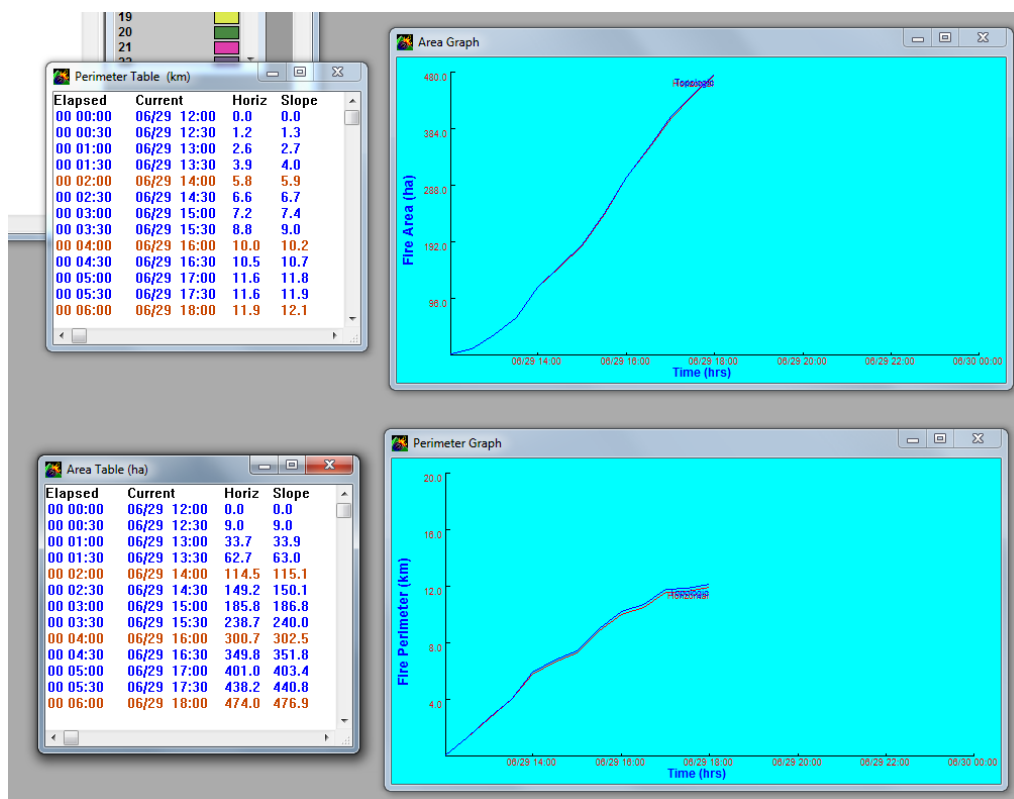


Figura 25. Resultados en formato de tablas y gráficos que ofrece FARSITE.

### 2.2.3. Descripción de escenarios de gestión

Con el objetivo de observar si el uso de tratamientos selvícolas ayuda en la prevención de incendios, se realizan las siguientes simulaciones:

- Situación actual (Escenario A)
- Situación actual con incremento de superficies agrícolas clasificadas como modelos PM1 y PM2, según inventario de cultivos abandonados proporcionado por el proyecto *Bioenergy and Fire Prevention*. (Escenario B)
- Reducción de la densidad aparente de los modelos arbolados, con motivo de los tratamientos selvícolas derivados de inventario forestal, elaborados por proyecto LIFE (Tolosana, 2013) (Escenario C)
- Reducción de la densidad aparente de los modelos arbolados y cambio de modelo de combustible a otro más óptimo en cuanto a menor combustibilidad. Estos cambios se resumen en la Tabla 13: (Escenario D)

Tabla 13. Resumen de los tratamientos selvícolas propuestos.

Pastos	<b>P1</b>	P1 es el modelo óptimo. Mediante desbroce mecanizado en los modelos P2 y P3 se consigue una reducción de la carga del combustible.
	<b>P2</b>	
	<b>P3</b>	

Pasto-matorral	<b>PM1</b>	PM1 es el modelo a conseguir. Mediante operaciones de desbroce se consigue una reducción de la carga del combustible
	<b>PM2</b>	

Matorral	<b>M1</b>	M1 es el modelo a conseguir. Mediante operaciones de desbroce se consigue una reducción de la carga del combustible
	<b>M2</b>	
	<b>M3</b>	

Matorral bajo arbolado adulto	<b>MA1</b>	Este modelo cuenta con un número de pies por hectárea elevado: 3500 pies/ha, luego el objetivo es reducirlo a 1000 pies/ha mediante trabajos de clareo sistemático o semi-selectivo, que supone una extracción del 72%
	<b>MA2</b>	Este modelo tiene 250 pies/ha. Reducción del 10% que supone 225 pies/ha
	<b>MA3</b>	Este modelo tiene 300 pies/ha, pero consta de matorral alto, luego con labores de desbroce se puede conseguir un modelo MA2. Reducción 10% que supone 270 pies/ha
	<b>MA4</b>	Este modelo tiene 300 pies/ha. Cuenta con restos leñosos junto arbolado adulto. Labores de limpieza y extracción a MA2. Reducción del 10% que supone 270 pies/ha

La reducción del 10 % se realiza como tratamiento sanitario de la masa, para eliminar los pies muertos o dominados, ya que la densidad que presenta cada modelo no necesita ser disminuida

Hojarasca bajo arbolado	<b>HA</b>	Este modelo es el óptimo a tener en toda la masa, ya que no tiene matorral y el arbolado es adulto y con una densidad de 250 pies/ha
-------------------------	-----------	--

Para cada simulación se consiguen los ficheros ráster de salida observados en la Tabla 12. Para su posterior análisis estadístico, de cada ráster se obtiene la media, valor máximo, valor mínimo, desviación estándar y la suma de los valores de las celdas.

#### 2.2.4. Análisis estadístico

Se utilizó el test no paramétrico de Mann-Withney ( $p < 0.05$ ) para comparar las medianas de la distribución de las variables de salida de las simulaciones entre el escenario actual de modelos de combustible (escenario A) y escenarios futuros según diferentes opciones de gestión de la biomasa:

1. Incremento de la superficie forestal por efecto del abandono de terrenos agrícolas (escenario B).

2. Disminución de la espesura en terrenos forestales arbolados en los que se realicen tratamientos de extracción exclusivamente de biomasa arbórea (modelos MA). En este escenario se asume que la extracción de biomasa supondría una disminución de la densidad aparente de copas ( $\text{kg/m}^3$ ) pero no supone extracción significativa de matorral bajo copas (escenario C)
3. Disminución de la espesura arbórea y extracción significativa de la biomasa arbustiva que suponga un cambio de modelo de combustible de matorral (modelos PM, M y MA) y de densidad aparente de copas (modelos MA). Por tanto es una situación en la que al escenario C se le añade un desbroce bajo copas y en el que además se realizaran extracciones de biomasa (escenario D)

Se compararon los valores medios, máximos y las desviaciones estándar de cada simulación entre el escenario A y los escenarios B, C y D respectivamente.

Los análisis preliminares efectuados informaron sobre el incumplimiento de los requisitos paramétricos. Por tanto para detectar tanto el efecto del factor escenario como las interacciones entre los escenarios con cambios más significativos y los puntos de inicio de los incendios en los diferentes modelos de combustible presentes, se utilizó un diseño factorial de ANOVA usando la regresión por mínimos cuadrados parciales (*Partial Least Squares* PLS). Los factores fueron el escenario con dos niveles (A y D) y los modelos de combustible (13 niveles para cada uno de los modelos presentes en los que se iniciaba cada simulación de incendio). Las variables dependientes fueron los valores medios correspondientes a las salidas de las simulaciones. Asumiendo el principio de parsimonia, se fijaron tres componentes con el objeto de que fueran lo más explicativos posibles y se comprobó el sentido físico de los coeficientes escalados de cada variable para valorar su importancia relativa en la construcción del modelo. Se consideró que los factores o interacciones con valores más altos de su coeficiente escalado y con mayores pesos (*X-Weights*) para las tres componentes seleccionadas son los más significativos para explicar las salidas de comportamiento del fuego y superficies afectadas.

Se utilizó el paquete STATISTICA® 7.0 para el análisis de los datos

## **2.3. Análisis de áreas cortafuegos y lógica fuzzy**

### **2.3.1. Planteamiento y justificación**

Las áreas cortafuegos se construyen con el fin de fraccionar el territorio como medida preventiva de los incendios forestales, siendo infraestructuras de apoyo y seguridad fundamentales en las operaciones de extinción. El alto coste de apertura y mantenimiento de cortafuegos puede verse en parte paliado por el aprovechamiento energético, al menos en una primera intervención. No obstante, un diseño adecuado determinará la forma óptima del área para que, cumpliendo los objetivos preventivos, permita optimizar la superficie de actuación reduciendo los costes de mantenimiento.

El Plan de la Demarcación de Xàtiva establece unas anchuras de las áreas en torno a un eje (camino, pista o zona decapada a suelo mineral), dependiendo del modelo de combustible que atravesase. Así, un modelo de matorral tiene unas medidas, en cuanto a anchura del cortafuego, más ancho, que un

modelo de arbolado ya que se prevén más velocidades de propagación e intensidades de llama. Dicho Plan de la Demarcación establece unas medidas bastante rígidas para la red de cortafuegos. Estas áreas se dividen transversalmente en tres fajas o bandas: banda de decapado, banda de desbroce y bandas auxiliares.

Aplicar la pertenencia difusa en la construcción de estas áreas puede ayudar a flexibilizar las actuaciones ya que permite considerar la pendiente del terreno y degrada las zonas de desbroce, lo que puede facilitar su gestión, reduciendo los impactos visuales de diseños basados en buffer lineales, como los establecidos hasta ahora.

### 2.3.2. Análisis *fuzzy*

El funcionamiento de la pertenencia difusa o lógica *fuzzy* consiste en transformar el ráster de entrada a una escala de 0 a 1, que indica la fortaleza de la pertenencia en un conjunto, en función de un algoritmo de difuminación especificado.

Un valor de 1 indica una pertenencia completa en el conjunto difuso; si la pertenencia disminuye a 0 quiere decir que no es miembro del conjunto difuso.

La herramienta utilizada es:

- *Fuzzy Membership*: tipos de pertenencia difusa utilizados:
  - Linear: define una transformación lineal desde un valor mínimo (en este caso 0) y un valor máximo (ancho de la banda de desbroce)

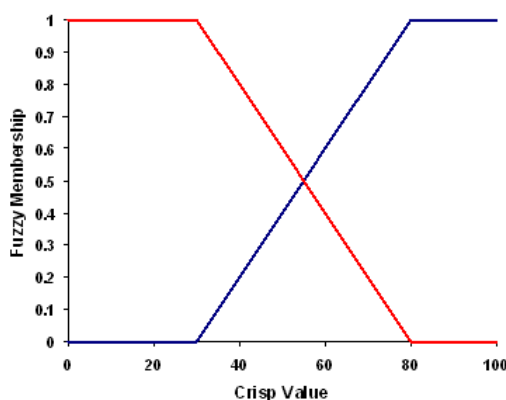


Figura 26. Función lineal *Fuzzy Membership*, (ESRI, 2012).

El objetivo de este apartado es poder observar las diferencias existentes entre hacer la red de cortafuegos mediante buffer lineales y buffer considerando la pendiente del terreno, mediante la herramienta *Cost Distance*. Sobre este buffer considerando la pendiente del terreno se puede aplicar la pertenencia difusa, en el sentido de obtener un gradiente como el que supondría hacer una degradación desde el eje central de los cortafuegos hasta el final de la banda de desbroce.

La anchura del área cortafuegos depende del orden del área cortafuegos, según lo asignado por el fraccionamiento del territorio y los modelos de combustible. Para el mejor uso de las herramientas se agrupan los modelos de combustible en 4 grandes grupos: pasto, pasto matorral, matorral y matorral bajo arbolado (Tabla 14).

Tabla 14. Superficie modelos de combustible agrupados (ha).

Modelos	Superficie (ha)
Pasto	385,27
Matorral	42774,61
Pasto-matorral	25884,42
Matorral bajo arbolado	59084,41

Los datos de los cortafuegos son facilitados por la Generalitat Valenciana, a través de su *Direcció General de Prevenció, Extinció d'Incendis i Emergències Conselleria de Governació*. El buffer fijo (decapado) que coincide con el ancho de la red, tiene unas medidas distintas según sea de orden 1, 6 metros y de orden 2, 3 metros. Las bandas de desbroce tienen distintos valores según el modelo de combustible que atraviesen (Tabla 15).

Tabla 15. Medidas de las áreas cortafuegos según el orden y el modelo de combustible.

Orden	Modelos	Banda de decapado (m)	Banda de desbroce (m)	Longitud (m)
1 orden	Pasto	6	12	8,08
	Matorral		70	157,78
	Pasto-matorral		30	172,56
	Matorral bajo arbolado		50	173,03
2orden	Pasto	3	5	2,86
	Matorral		30	114,49
	Pasto-matorral		15	93,67
	Matorral bajo arbolado		20	144,25

En el resto de la superficie de la zona de estudio se consigue un ráster a partir de pendientes reclasificadas en 0-5% (1), 5-10%(2), 10-30%(3), 30-60%(4) (límite de mecanización) y <60% (5), en el que mediante *Cost Distance*, se consigue una capa ráster con distancias que tienen en cuenta el esfuerzo que causa recorrerlas.

Las herramientas de *fuzzy membership*, usan esta capa para hacer que las distancias al cortafuegos sean de pertenencia borrosa: 0 valor cercano al eje central, 1 valor en el límite del ancho de la banda de desbroce.

### 2.3.3. Análisis estadístico

Para el análisis entre las superficies obtenidas a través de buffer lineal y buffer *fuzzy* se utiliza un Friedman ANOVA, donde el factor es el tipo de buffer (*fuzzy* o lineal) y la variable dependiente es la superficie total de la red de cortafuegos del macizo de Caroig. Se consideran 8 réplicas por tipo de buffer correspondientes a las superficies calculadas para cada grupo de modelos de combustible (pasto, matorral, pasto-matorral, matorral bajo arbolado) en los dos órdenes de importancia de los cortafuegos (1º y 2º orden).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Análisis de la eficacia preventiva de escenarios selvícolas y de gestión de combustible para la obtención de biomasa

Los test de Mann-Whitney para comparar el escenario actual con los escenarios definidos muestran diferencias significativas para las variables de salida (outputs) obtenidas en las simulaciones FARSITE entre diferentes escenarios (Tabla 16).

Se puede comprobar que el paso de superficie agrícola abandonada a modelos de combustible forestal (escenario B) supone un incremento significativo en muchos de los parámetros de comportamiento y en la superficie y perímetro final medio. El aumento de superficies forestales por abandono agrícola en el área de estudio, ya había sido mencionado como una amenaza para la aparición de grandes incendios, (Quílez y Chinchilla 2013). Como era esperable, no se detectaron diferencias significativas en el número de píxeles con actividad de copas (pasivo o activo) ya que sólo se ha considerado un incremento en la superficie ocupada por pastos y matorrales.

La extracción exclusivamente de biomasa arbórea (escenario C) que supone una disminución de la biomasa y la densidad aparente de copas en los modelos MA, no ha supuesto una disminución significativa de los parámetros de comportamiento del fuego y la superficie afectada. Sin embargo la inclusión de la extracción de matorral que supusiera cambios de modelos de combustible (escenario D) genera diferencias significativas en todas las variables excepto en el número de píxeles con fuego activo de copas, (Stephens 1998)

Es de destacar que todos los tratamientos han supuesto una disminución de la variabilidad (desviación estándar) de los parámetros de salida del incendio aunque su mediana no ofrezca diferencias significativas en el caso del tratamiento C respecto al A (Figura 27). Por tanto en todos los casos parece existir una tendencia a disminuir las condiciones extremas de propagación, siendo comportamientos del fuego en un rango más reducido, también para el escenario C, (Stephens y Moghaddas 2005).

Tabla 16. Resultados del análisis estadístico (valores del estadístico U de Mann-Withney y p-valor) entre los escenarios A y B, escenarios A y C y escenarios A y D. En rojo se muestran los valores con un nivel de significación mayor del 95%, en azul, mayor del 90%.

Variable	Comparación escenarios A y B		Comparación escenarios A y C		Comparación escenarios A y D	
	Test U Mann-Withney	p	Test U Mann-Withne y	p	Test U Mann-Withne y	p
Área pendiente (ha)	99,0	0,01312	62,5	0,48973	376,0	0,00003
Perímetro pendiente (km)	91,5	0,00703	57,5	0,37268	410,5	0,00013
FLI_MEAN	99,0	0,01312	64,0	0,54109	431,0	0,00030
FML_MEAN	111,0	0,03027	68,0	0,65065	429,0	0,00028
ROS_MEAN	122,0	0,05939	42,5	0,12928	437,0	0,00038
HPA_MEAN	121,0	0,05605	66,5	0,59479	495,0	0,00305
RCI_MEAN	155,0	0,28528	55,5	0,33074	431,0	0,00030
CFR_SURFACE	85,0	0,00424	58,5	0,39475	362,0	0,00001
CFR_PASSIVE	154,5	0,27446	74,5	0,82861	462,5	0,00098
CFR_ACTIVE	188,5	0,78363	62,0	0,48973	659,0	0,17736
FLI_MAX	111,0	0,03027	61,0	0,46497	484,0	0,00211
FML_MAX	116,0	0,04155	65,0	0,56763	445,5	0,00052
ROS_MAX	127,0	0,07854	65,5	0,56763	534,0	0,01009
HPA_MAX	154,5	0,27446	75,5	0,85937	343,5	0,00001
RCI_MAX	94,5	0,00894	72,5	0,76783	473,5	0,00144
FLI_SD	97,0	0,01128	65,0	0,56763	501,0	0,00370
FML_SD	118,0	0,04693	71,0	0,73790	552,0	0,01666
ROS_SD	103,0	0,01755	49,5	0,22247	520,0	0,00669
HPA_SD	107,0	0,02319	74,5	0,82861	509,0	0,00477
RCI_SD	127,0	0,07854	79,5	0,98427	480,0	0,00184

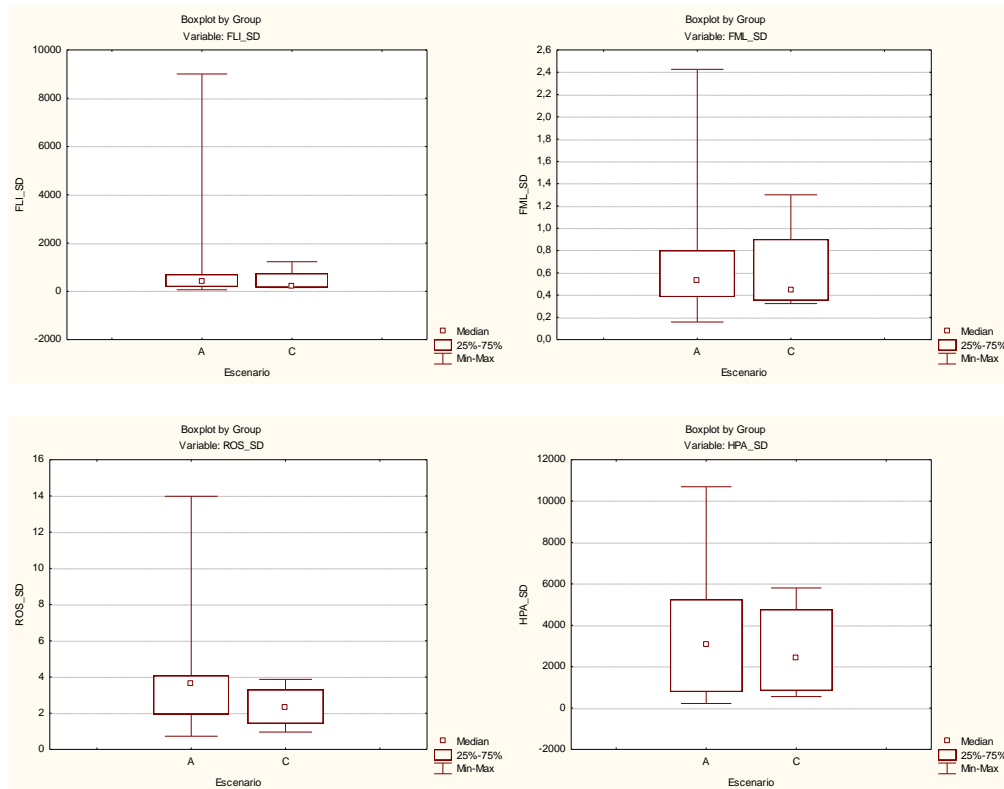


Figura 27. Media y rango de la desviación estándar (SD) de las variables de salida FARSITE para los escenario A y C: intensidad lineal (FLI), longitud de llama (FLA), velocidad de propagación (ROS) y calor por unidad de área (HPA).

Los escenarios A y D son los que han mostrado las mayores diferencias con lo que se decidió aplicar un ANOVA PLS para determinar el efecto combinado del escenario y los modelos de combustible en los que se iniciaban los incendios ( $R^2Y=0,54$ ,  $R^2X=0,25$ , 3 componentes).

Los resultados ratifican que es el escenario el factor de mayor importancia explicativa de las variables de salida de FARSITE, no obstante se han detectado el efecto positivo o negativo de algunos modelos de combustible y de las interacciones entre el modelo de combustible y el escenario. En la Figura 28, donde se muestran los coeficientes escalados del modelo, se puede comprobar que es el escenario A (sin intervención), los incendios que empiezan en modelos PM1, P3 (+), los modelos MA2, MA3, MA4 (-) y las interacciones M2 y M3 con el escenario A (+) los factores que más incrementan la superficie afectada por el incendio. Por tanto es la intervención en los modelos de matorral M2, M3, PM1 y P3 en el escenario actual lo que permitirían reducir mejor la superficie afectada por el fuego en caso de un gran incendio. La eficacia en la reducción de los parámetros de comportamiento en modelos de matorral ha sido contrastada en experimentos de campo (Marino et al. 2011) cuyo comportamiento ha sido también validado mediante modelos físicos (Marino et al. 2012, Jiménez et al. 2013). Sin embargo y tal como obteníamos en los test no paramétricos, los incendios iniciados en modelos de matorral y arbolado (MA) tienen menos importancia para explicar la superficie total afectada.



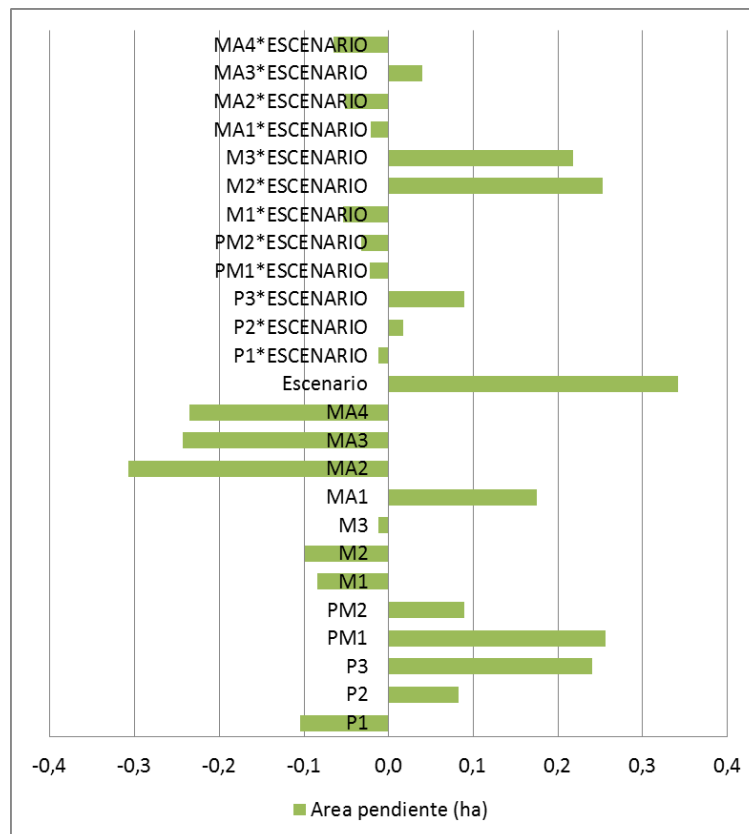


Figura 28. Coeficientes escalados de superficies, según la interacción entre los escenarios A y D.

En la Figura 29 se detallan los coeficientes escalados del modelo en cuanto a los valores medios de intensidad de llama. Se observa que sigue la tendencia de las superficies, siendo el escenario, los modelos PM1 y PM3, el modelo MA1 (a diferencia del resto de modelos de matorral arbolado) y las interacciones de los modelos M2 y M3 con el escenario los que aumentan la intensidad de llama, lo que podría producir más problemas en las tareas de extinción (fuegos fuera de capacidad de extinción). Los resultados sugieren que si queremos reducir la intensidad lineal para tener más oportunidades de control del incendio por los servicios de extinción, podría ser eficaz la intervención en modelos MA1 reduciendo la densidad aparente de copas, (Stephens y Moghaddas 2005, Crecente-campo et al. 2009, Jiménez et al. 2013). Como ya se ha comentado estos tratamientos no tienen efectos sobre el resto de las variables si no vienen además acompañadas de cambios de modelos de combustible en los modelos de matorral (M2, M3), pasto (P3) y pasto-matorral (PM1), que son los que aumentan de manera negativa la superficie afectada por los incendios, (Stephens 1998).

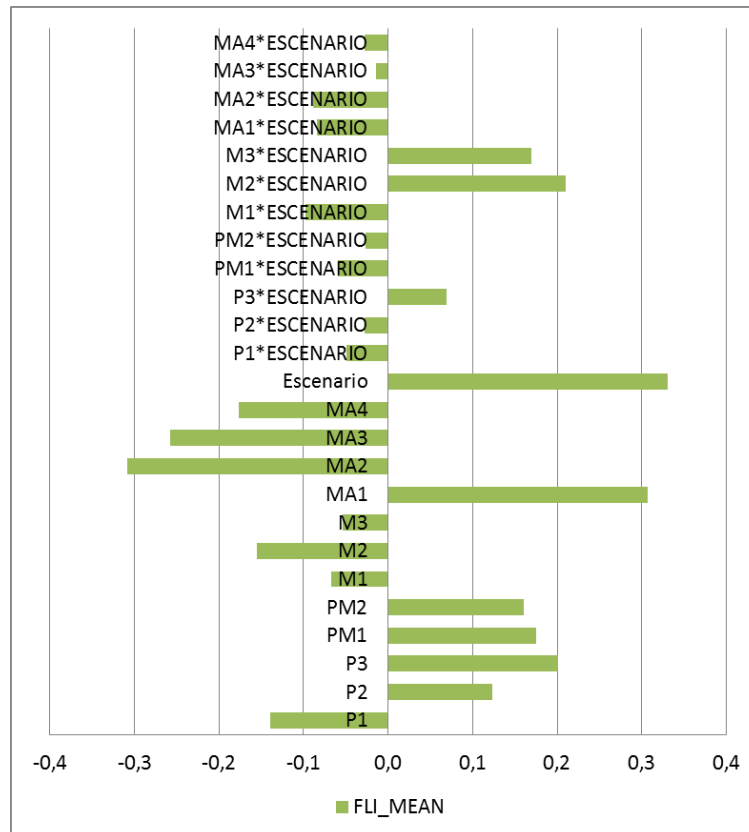


Figura 29. Coeficientes escalados de Intensidad del frente de llama (FLI), según la interacción entre los escenarios A y D.

En los resultados obtenidos al comparar la influencia de la presencia de fuego a copas (Figura 30), se puede observar que aun cuando el punto de ignición se encuentra dentro de modelos de matorral (M3 y M2), o de pasto y pasto matorral (P3 y PM1) se sigue la tendencia general que cumplen todas las variables estudiadas del comportamiento del fuego. Ello indicaría que la presencia de fuego de copas no depende tanto de la disminución de combustible en zonas arboladas (MA) como en los cambios de modelos de las grandes extensiones de matorral con alta carga de combustible (Interacción escenario\*M2, escenario\*M3). Los incendios iniciados en estas áreas generarían una intensidad suficiente como para aumentar el potencial de fuegos de copa en las áreas colindantes de modelos MA. Estos resultados indicarían que un cambio de modelos M2 y M3 a M1 tal como se plantea en el escenario D, no sólo tendría un efecto significativo en la disminución de la superficie total sino que disminuiría la presencia de áreas con fuego activo de copas. La necesidad de actuar a gran escala como única alternativa a la reducción de las superficies afectadas por los incendios coincide con recientes resultados de simulaciones con MEDFIRE en diferentes escenarios de régimen de incendios y tipos de gestión en Cataluña, (Regós *et al.*, 2013, Brotons *et al.*, 2013).

Estos resultados se pueden observar en las Figuras 31, 32, en las que se ven las diferencias entre los perímetros del escenario A, con los escenarios B, C y D. En la Figura 33 se detallan los ráster de salida de intensidad del frente de llama y de calor por unidad de superficie entre los escenarios A, C y D.

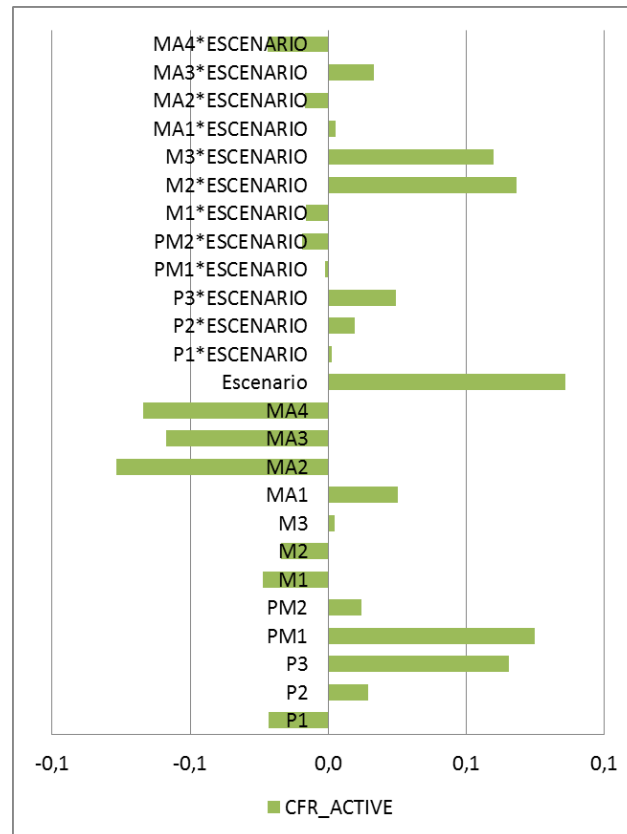


Figura 30. Coeficientes escalados de la variable subida de fuego a copa, según la interacción entre los escenarios Ay D.

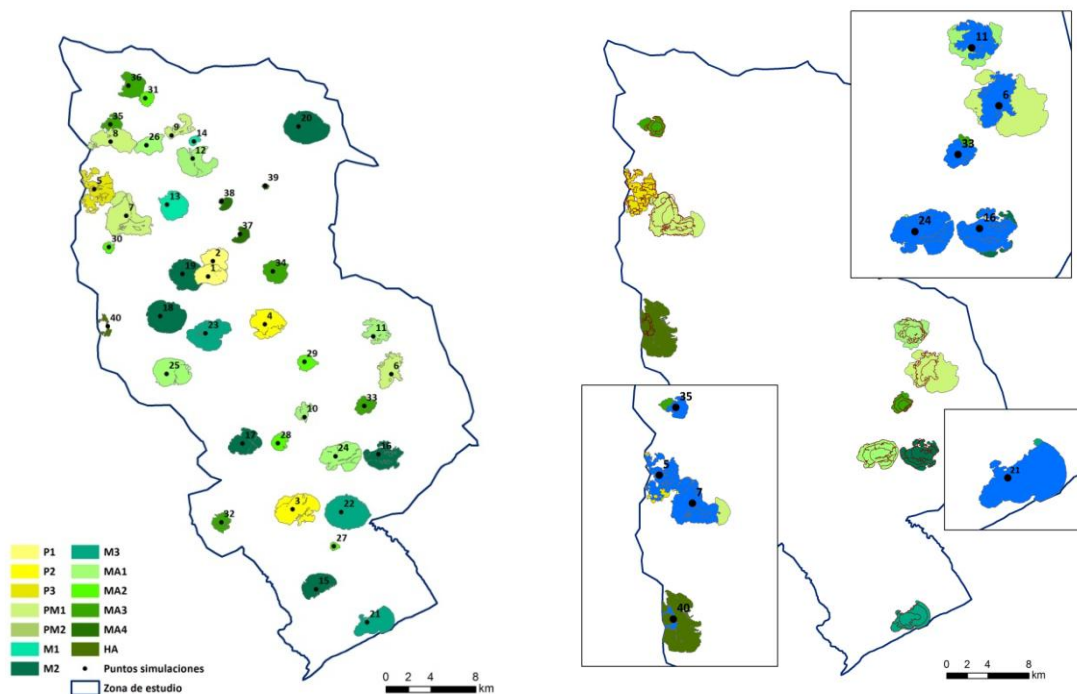


Figura 31. Izquierda: Simulación escenario actual. Derecha, comparación entre los escenarios A y B, en el detalle se puede observar cómo han aumentado los perímetros (en colores) respecto a los del escenario A (en azul).

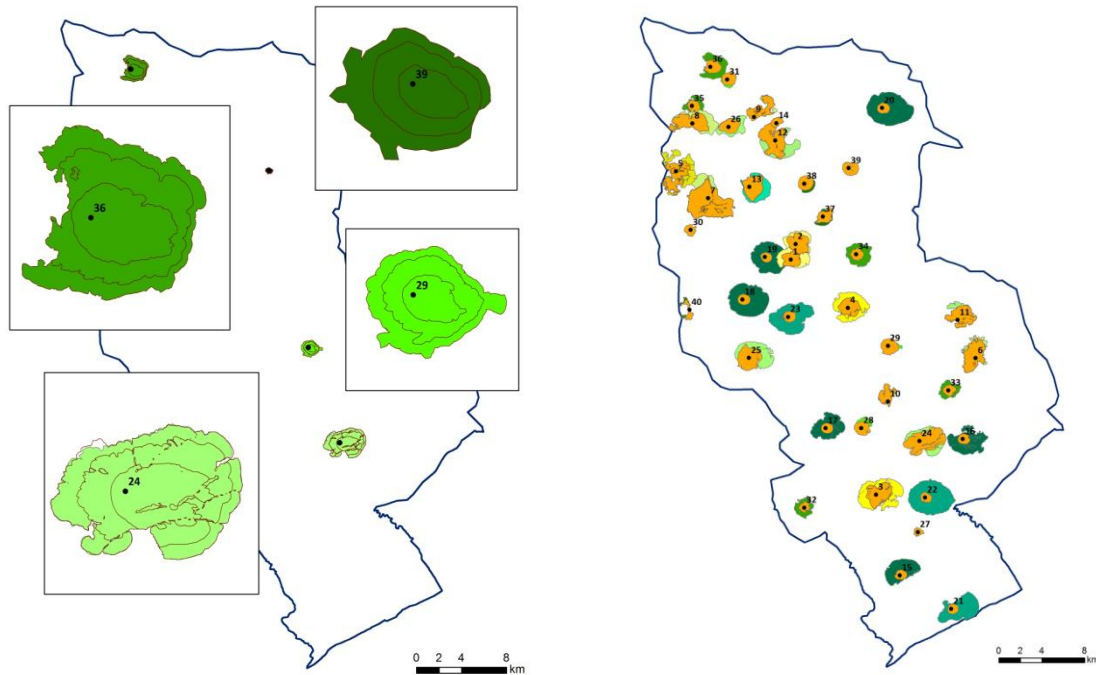


Figura 32. Izquierda: comparación entre los escenarios A y C, en el detalle se puede observar cómo los perímetros permanecen similares salvo en el punto 24, en el que se observan alteraciones. Derecha, comparación entre los escenarios A y D, en el detalle se puede observar cómo han disminuido los perímetros (en naranja) respecto a los del escenario A (en colores).

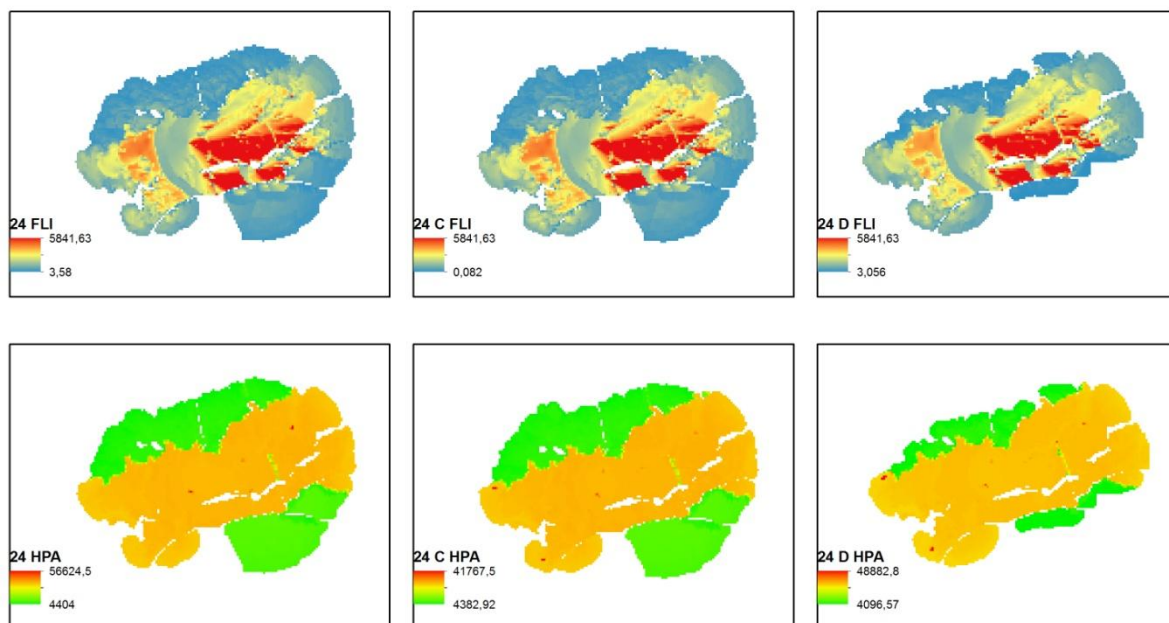


Figura 33. Detalle de los resultados obtenidos para el punto 3 (debido a que presentaba subida de fuego a copa). En la parte superior se muestran los cambios de intensidad del frente de llama (FLI) entre los escenarios A, C y D. En la parte inferior, se pueden ver las diferencias de calor por unidad de área (HPA) entre los escenarios A, C y D.

### 3.2. Análisis de la red de cortafuegos mediante lógica fuzzy

Los resultados obtenidos del análisis estadístico (Figura 34), donde se comparan los 8 datos de superficie, según modelo de combustible y orden, (Tabla 17) en cada uno de los escenarios (*fuzzy* y lineal) demuestran que la superficie en el escenario *fuzzy* es significativamente menor que utilizando el buffer lineal ( $p\text{-valor}=0,011719$ ), lo que significaría una optimización de los recursos a la hora de ejecutar el mantenimiento de las redes de cortafuegos consideradas en el Macizo de Caroig.

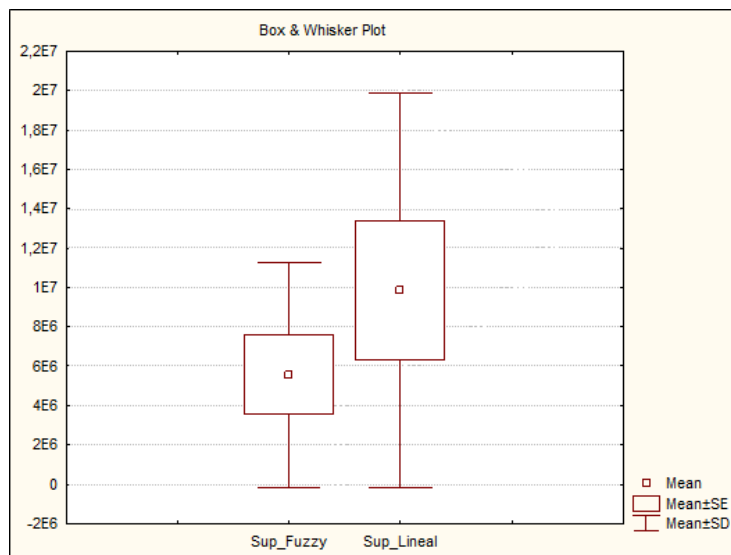


Figura 34. Resultados del análisis estadístico entre las superficies resultantes de construir un buffer lineal y otro mediante *Cost Distance* y pertenencia difusa. El Friedman ANOVA muestra diferencias significativas al 95% en ambos tipos de buffer para el cálculo de las superficies de actuación ( $p<0,05$ ).

Tabla 17. Resultado de las superficies ( $m^2$ ) buffer lineales y buffer *fuzzy*.

Orden	Modelos	Superficie buffer eje central ( $m^2$ )	Superficie buffer <i>fuzzy</i> ( $m^2$ )	Media	Superficie buffer lineal ( $m^2$ )
1 orden	Pasto	99672	131400	0,31	214696
	Matorral	1936980	15734928	0,46	27037252
	Pasto-matorral	2131856	7610924	0,41	12130348
	Matorral bajo arbolado	2152564	11748012	0,45	22078960
2orden	Pasto	17648	16492	0,32	31616
	Matorral	695200	4213524	0,45	7695108
	Pasto-matorral	572280	1815108	0,41	3138204
	Matorral bajo arbolado	879664	3173188	0,32	6481740

Al ser un ancho de desbroce irregular, tanto en el interior del área como en los bordes exteriores, se obtienen áreas de menor impacto visual y adaptadas al terreno ya que se ha usado la pendiente como variable de cálculo (Figura 35). El uso de dicha variable asegura además mayores anchuras en zonas de mayor pendiente lo que está justificado desde el punto de vista preventivo, (Pimont et al. 2009).

Los valores de la degradación difusa se pueden reclasificar en rangos en los cuales se establezca la cantidad de biomasa a extraer, por ejemplo (Tabla 18):

Tabla 18. Ejemplo extracción mediante rangos *fuzzy*.

Reclasificación <i>fuzzy</i>	% a extraer
0-0,2	10%
0,2-0,4	25%
0,4-0,6	40%
0,6-1	100

Así en términos de gestión, contando con datos de inventario de pasto y matorral, se puede cuantificar la biomasa a extraer. La determinación de los puntos de corte de los rangos se puede establecer a criterio del gestor o directamente en la ejecución de los trabajos, lo que resulta un buffer más flexible tanto para su ejecución como para su mantenimiento.

En la Tabla 17 se detallan también los datos medios de los valores *fuzzy* en cada buffer. Todos los registros son menores a 0,5, lo que demuestra que la pendiente tiene un gran peso a la hora de hacer el buffer, por lo que se justifica la opción de utilizar las distancias en función de costes en esfuerzo.

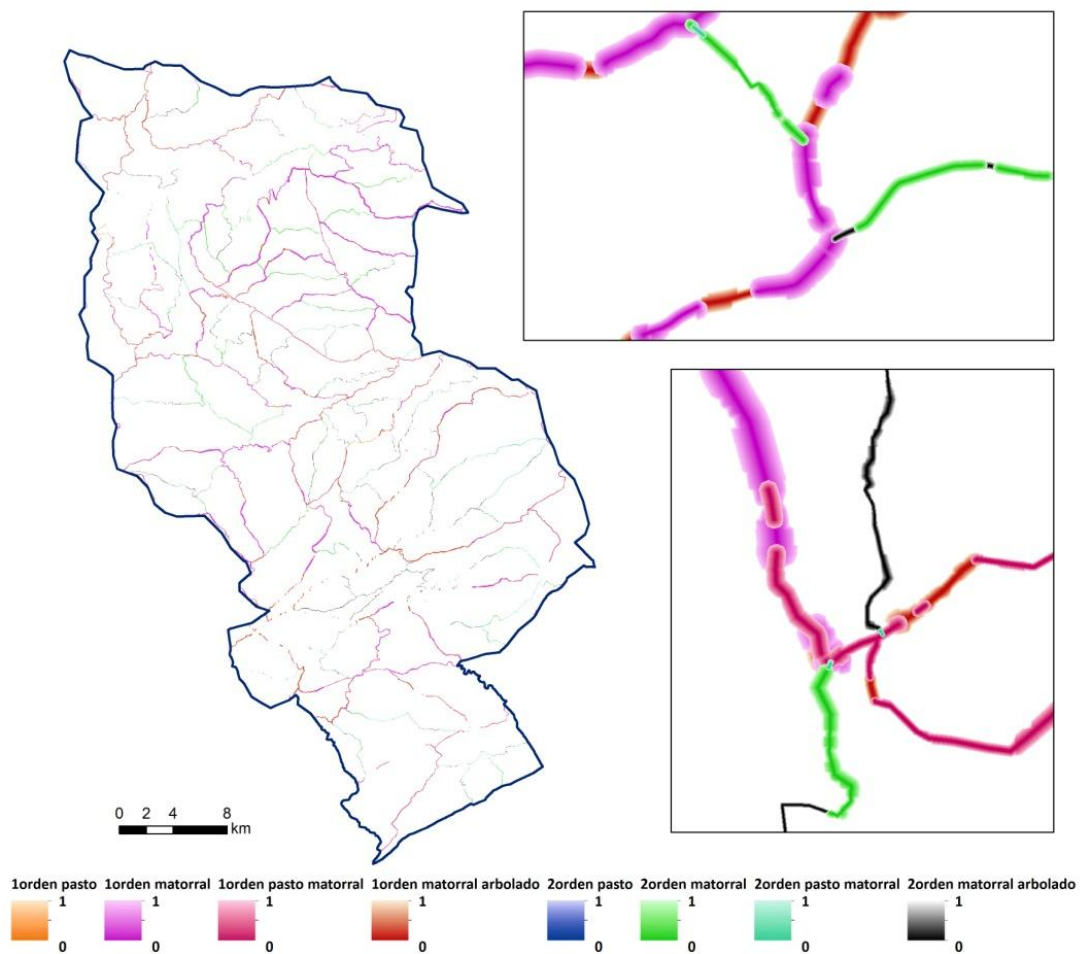


Figura 35. Áreas cortafuegos mediante pertenencia difusa y detalle de dos zonas, donde se puede observar los diferentes tamaños de los buffer.

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA LA GESTIÓN

- El presente trabajo es uno de los primeros, según los antecedentes y bibliografía consultados, en utilizar los simuladores de incendios a escala paisaje, con el fin de aplicar medidas selvícolas con fines energéticos que ayuden en la prevención de incendios forestales en España.
- Los resultados obtenidos indican que la distribución espacial de los combustibles y la realización de tratamientos selvícolas influyen en los patrones de propagación de los incendios.
- Los tratamientos selvícolas establecidos en el contexto del proyecto *Bioenergy and Fire Prevention*, no suponen una medida significativa de la prevención de incendios a no ser que se actué a gran escala, extrayendo gran cantidad de biomasa en las zonas de pasto y matorral. Los resultados conseguidos de la comparación de los diferentes escenarios demuestran que:
  - El abandono de la agricultura modifica los modelos de combustible, pasando de ser una zona no combustible a tener valores de pasto-matorral, por lo que se debe de tener en cuenta en la gestión de la zona y en las medidas de prevención
  - Con la gestión de las zonas arboladas se consigue reducir la densidad aparente del dosel de copas, pero no es así con las superficies de las zonas simuladas. Al añadir el resto de tratamientos, desbroces, para conseguir modelos de combustible más óptimos, se denotan diferencias significativas en la gestión de los modelos de matorral y pasto matorral. Por lo que la aplicación de tratamientos exclusivamente sobre la masa arbolada, no consigue lo esperado en términos de prevención de incendios.
- El uso de los tres simuladores utilizados para evaluar el comportamiento del fuego cuando se plantean diferentes medidas de gestión, en condiciones meteorológicas extremas, es adecuado para la zona de estudio del Macizo de Caroig. En concreto, la utilización de FARSITE, debido a los resultados observados, plantea que su uso en diferentes escenarios, detecta diferencias significativas en la predicción del comportamiento del fuego y permite observar y evaluar esos cambios a corto plazo. No obstante es necesario seguir profundizando en la comparación de simuladores ya que, teniendo en cuenta que los tres utilizados en este trabajo usan el modelo de Rothermel (FARSITE, Wildfire Analyst, Visual-Cardin), se han obtenido grandes discrepancias en los resultados de simulaciones libres.
- La información procedente de datos LIDAR de alturas de arbolado y cobertura vegetal junto con los datos del inventario forestal realizado, han permitido obtener información de la biomasa a extraer y de la densidad aparente en zonas arboladas, estableciendo una relación entre las alturas procedentes de los datos LIDAR y los diámetros normales del inventario forestal. El moderado ajuste de los modelos diámetro-altura obtenidos en campo sugieren la alta irregularidad de estas masas. Por tanto la extensión de estos datos a escala paisaje mediante los datos de altura del LIDAR de PNOA se deben tomar con prudencia en tanto que se validen en campo.
- La información del MDT (Modelo Digital Del Terreno) descargada del IGN (PNOA), la adaptación de los modelos de combustible realizada por el Consorcio de Bomberos, junto con las capas de alturas, densidad aparente y cobertura vegetal, caracterizan de manera adecuada la mayor parte del paisaje de la zona de estudio. Los datos LIDAR expresan las

alturas de la zona, que para el uso en mediciones de masas arboladas, se puede considerar demasiado en detalle debido a que cada pulso LIDAR puede captar la altura de un matorral y en el pixel vecino, la altura de un árbol, así como errores debidos a otros obstáculos como torretas de comunicaciones, líneas eléctricas, etc... El procesado de estos datos mediante una reclasificación en ArcGIS, es fundamental, debido a que las alturas de arbolado deben estar en un rango de altitudes razonable, debiéndose comprobar y validar con los datos de inventario forestal, en la zona que se trate.

- Los datos de alturas procedentes de vuelos LIDAR regulares ayudaría a que la capa de modelos de combustible pueda ser actualizada con inventarios de campo, ya que se ha observado que existen zonas en las que no concuerdan las alturas LIDAR con el modelo de combustible propuesto, ya sea por un incendio reciente o una mala clasificación debido a que no están basados en datos de campo.
- El uso de la pertenencia difusa en la creación de redes cortafuegos en el Macizo de Caroig en un contexto energético también es un proyecto pionero en España, según bibliografía consultada. Se observa que es efectivo en cuanto a optimización de los recursos, debido a que se puede cuantificar la cantidad de biomasa de la superficie a extraer y así paliar los costes que supone construir y mantener dicha infraestructura. Al tener en cuenta la pendiente del terreno, se justifica en términos de prevención de incendios. Una línea de trabajo futura puede ser la introducción de más variables en la construcción de los buffer fuzzy, como pueden ser otros componentes del triángulo del fuego: viento dominante, vientos locales debido a la topografía, exposición de la ladera por su efecto en la desecación de combustibles, o la combinación de todas ellas.



## 5. BIBLIOGRAFÍA

AGEE J.K., BAHRO B., FINNEY M., OMI P., SAPSIS D., SKINNER C., VAN WAGTENDONK J.W., WEATHERSPOON P., 2000. The use of shaded fuelbreaks in landscape fire management. *Forest Ecology and Management* 127: 55-66.

ALBINI F. A., 1976. Estimating wildfire behavior and effects. General Technical Report INT-30. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.

ANDERSON H.E., 1982. Aids to Determining Fuel Models for Estimating Fire Behaviour. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station General Technical Report.

APPA (de Gregorio M. coord.), 2012. Balance económico de la actualización de las retribuciones a la producción eléctrica a partir de las biomásas. Asociación de Productores de Energías Renovables. Madrid. 30 pp.

BROTONS L., AQUILUE N. DE CÁCERES M., FORTIN M.J. y FALL A., 2013. Factores que afectan al régimen de incendios en los paisajes mediterráneos: interacciones entre el cambio climático, las estrategias de extinción y la historia previa de incendios. 6º Congreso Forestal Español. Vitoria-Gasteiz. Disponible on-line [www.congresoforestal.es](http://www.congresoforestal.es)

CACHO NERÍN, C., SENDRA FERRER, J., SANZ ARAUZ, G., BUISÁN SANZ, S., CANTÓN TOBAJAS, D., JULVE DEL VAL, J., MIRALLES FRANCÉS, F., CORTÉS RABINAD, F.J., LAFRAGÜETA PÉREZ, C., 2009. Análisis meteorológico y del comportamiento del fuego del gran incendio forestal de Zuera (Zaragoza) de 5 de agosto de 2008. 5º Congreso forestal Español. Ávila 2009. Disponible on-line [www.congresoforestal.es](http://www.congresoforestal.es)

CRECENTE-CAMPO A.F., POMMERENINGB A., RODRÍGUEZ-SOALLEIRO R., 2009. Impacts of thinning on structure, growth and risk of crown fire in a *Pinus sylvestris* L. plantation in northern Spain. *For Ecol Manage* 257 (9): 1945–1954.

DURALDE M.A., TOLOSANA E., DE GREGORIO M. (Madrigal J. Coord.), 2012. El aprovechamiento energético de la biomasa forestal y la prevención de incendios. Conclusiones de la Jornada de Debate SELVIRED-FIRESMART. INIA. Madrid. 15 pp. Disponible on line [http://www.firesmart-project.eu/docs/workshop\\_selvired/Conclusiones\\_Jornada\\_SELVIRED-FIRESMART.pdf](http://www.firesmart-project.eu/docs/workshop_selvired/Conclusiones_Jornada_SELVIRED-FIRESMART.pdf)

ESRI, 2012. Pertenencia difusa (Spatial Analyst) en Centro de Recursos de ArcGIS 10. Disponible on-line: <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//009z000000rn000000>

FERNÁNDEZ-ALONSO, J.M., VEGA HIDALGO, J.A., ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J. G., ALBERDI, I., RUIZ-GONZÁLEZ, A.D., CAÑELLAS, I. y JIMÉNEZ CARMONA, E., 2013. Sensibilidad al fuego de copas en las masas de pinares de la provincia de Pontevedra. 6º Congreso Forestal Español. Vitoria 2013. Disponible on-line [www.congresoforestal.es](http://www.congresoforestal.es)

FINNEY M.A., 1994. Modeling the Spread and Behaviour of Prescribed Natural Fires. In *Proceedings of the 12<sup>th</sup> Conference on Fire and Forest Meteorology*.

FINNEY M.A., RYAN K.C., 1995. Use of the FARSITE Fire Growth Model for Fire Prediction in the U.S. National Parks. In: Sullivan J.D., Wybo J.L., Buisson L. (ed.), 1995. "International Emergency Management and Engineering Conference", Paris, France: International Emergency Management and Engineering Society.

FINNEY, M. A.; SAPSIS, D. B.; BAHRO, B., 2002. Use of *FARSITE* for simulating fire suppression and analyzing fuel treatment economics. In: Symposium on fire and California ecosystems: integrating ecology, prevention and management; 1997.

FINNEY, M. A., 2004. *FARSITE*: Fire Area Simulator—model development and evaluation. Research Paper RMRS-RP-4 Revised. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

FINNEY M.A., SELI R.C., MAHUGH C.W., AGER A.A., BAHRO B., AGREE J.K., 2007. Simulation of long-term landscape-level fuel treatment effects on large wildfires. *International Journal of Wildland Fire* 16 (6): 712-727.

GONZALEZ J.R., RODRIGUEZ F., FERNANDEZ A., MOLA B., 2012. Mapping fire risk in the Model Forest of Urbión (Spain) based on airborne LIDAR measurements. *Forest Ecology and Management* 282: 149-156.

GUIJARRO M., 2003. Comportamiento del fuego y régimen térmico en diferentes complejos de combustible forestal. Tesis Doctorales INIA. Serie Forestal. Ministerio de Ciencia y Tecnología. INIA. Madrid.

JIMÉNEZ E., VEGA J.A., RUIZ-GONZÁLEZ A.D., GUIJARRO M., ALVAREZ-GONZÁLEZ J.G., MADRIGAL J., CUIÑAS P., HERNANDO C., FERNÁNDEZ-ALONSO J.M., 2013. Carbon emissions and vertical pattern of canopy fuel consumption in three *Pinus pinaster* Ait. active crown fires in Galicia (NW Spain). *Ecological Engineering* ,54: 202–209.

JIMÉNEZ E., VEGA J.A., FERNÁNDEZ C., FONTÚRBEL M.T., PÉREZ-GOROSTIAGA P., 2013. Evaluación de la eficacia de tratamientos preventivos en matorral mediante el modelo físico de predicción de comportamiento del fuego WFDS. 6º Congreso Forestal Español. Vitoria 2013. Disponible on- line [www.congresoforestal.es](http://www.congresoforestal.es)

LINN R.R., 1997. A transport model for prediction of wildfire behavior. PhD Dissertation, Los Alamos National Laboratory, NM, Science Report LA–13334T.

MARINO E., GUIJARRO M., HERNANDO C., MADRIGAL J., DÍEZ C., 2011 Fire hazard after prescribed burning in a gorse shrubland: implications for fuel management. *J Environ Manage*; 92(3): 1003–1011.

MARINO E., DUPUY J.L., PIMONT F., GUIJARRO M., HERNANDO C., LINN R., 2012. Fuel bulk density and fuel moisture content effects on fire rate of spread: a comparison between FIRETEC model predictions and experimental results in shrub fuels. *J Fire Sci* 31: 131-142.

MARTÍNEZ MILLÁN J., VIGNOTE S., MARTOS J., CABALLERO D., 1991. CARDIN, un Sistema para la Simulación de la Propagación de Incendios Forestales. Mapa, Investigación Agraria, Sistemas y Recursos Forestales 1: 121-133.

MARTÍNEZ-MILLÁN J., MARTOS COLLADO J., VIGNOTE PEÑA S., CABALLERO VALERO D., 1993. Simulación de la propagación y combate de fuegos forestales. I Congreso forestal Español. Lourizán, Pontevedra. Disponible on- line [www.congresoforestal.es](http://www.congresoforestal.es)

McIVER J., YOUNGBLOOD A., and STEPHENS S.L., 2009. The national Fire and Fire Surrogate study: ecological consequences of fuel reduction methods in seasonally dry forests. Ecological Applications 19: 283–284.

MOLINA, D.M., MARTINEZ E.R., GARCIA D., 2006. Farsite simulations for cost-efficient wildland fire planning: Case studies in Spain. Forest Ecology and Management 234S.

MONTERO G., RUIZ-PEINADO R., MUÑOZ M., 2005. Producción de biomasa y fijación de CO<sub>2</sub> por los bosques españoles. Monografías INIA. Serie Forestal nº13.

PIMONT F., DUPUY J.L., LINN R.R., 2009. Validation of FIRETEC wind-flows over a canopy and a fuel-break. Int J Wildland Fire 2009; 18: 775–790.

QUÍLEZ R., CHINCHILLA S., 2013. Caracterización de modelos de combustible en la provincia de valencia. FLAMMA. 3 (2): 31-40.

QUÍLEZ R., 2013. Incendios convectivos en España: Casos de estudio y recomendaciones en las estrategias de extinción. 6º Congreso Forestal Español. Vitoria 2013. Disponible on- line [www.congresoforestal.es](http://www.congresoforestal.es)

REGOS A., BROTONS L., AQUILUÉ N. y DE CÁCERES M., 2013. Uso de estrategias oportunistas de extinción para reducir el impacto de los incendios en condiciones climáticas extremas. 6º Congreso Forestal Español. Vitoria-Gasteiz. Disponible on- line [www.congresoforestal.es](http://www.congresoforestal.es)

RICHARDS G.D., 1990. An Elliptical Growth Model of Forest Fire Fronts and its Numerical Solution. International Journal for Numerical Methods in Engineering 30 (6):1163-1179.

RICHARDS G.D., 1995. A general mathematical framework for modelling two-dimensional Wildland Fire Spread. International Journal of Wildland Fire 5 (2):63-72

RODRÍGUEZ SILVA F. y MOLINA J.R., 2010. Manual Técnico para la modelización de la combustibilidad asociada a los ecosistemas forestales mediterráneos. Laboratorio de Defensa contra incendios forestales. Departamento de Ingeniería forestal. Universidad de Córdoba. Córdoba. 90 pp.

ROSS D.G., KRAUTSCHNEIDER M., SMITH I.N., LORIMER G.S., 1988. “Diagnostic Wind Field Modelling: Development and Validation”. Centre for Applied Mathematical Modelling, Chisholm Institute of Technology.

ROTHERMEL R.C., 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Research Paper No. INT-115, Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.

ROTHERMEL R.C., 1991. Predicting behavior and size of crown fires in the Northern Rocky Mountains. Research Paper INT-438. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station.

SCOTT J.H., BURGAN R.E., 2005. Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

SECF, 2013; La situación de los bosques y el sector forestal en España. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Disponible on-line: <http://www.seforestales.org/web/images/ISFE/isfe2013v1.pdf>

SERRADA R., 2008. Apuntes de silvicultura. Escuela de Ingeniería Técnica Forestal. UPM.

STEPHENS S., 1998. Evaluation of the effects of silvicultural and fuels treatments on potential fire in Sierra Nevada mixed-conifer forests. *Forest Ecology and Management* 105: 21-35.

STEPHENS S.L. y MOGHADDAS J., 2005. Experimental fuel treatment impacts on forest structure potential fire behaviour and predicted tree mortality in a California mixed conifer-forest. *Forest and Ecology and Management* 215: 21-36.

TOLOSANA E., MADRIGAL J., PLANELLES R., HERNANDO C., GUIJARRO M., FERNÁNDEZ I., 2013. Propuesta de línea de base selvícola para la producción sostenible de biomasa y la prevención de incendios en los pinares de carrasco de Moixent-Enguera. Documento interno proyecto *Bioenergy and Fire Prevention*.

VAN WAGNER C.E., 1977. Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal Forest Research* 7: 23-34.

VAN WAGNER C.E., 1983. Simulating the effect of forest fire on long term annual timber supply. *Can. J. For. Res.* 13 (3): 451-457.

VAN WAGNER C.E., 1993. Prediction of Crown Fire Behaviour in two Stands of Jack Pine. *Canadian Journal of Forest Research* 23 (3): 442-449.

VEGA J.A., CUIÑAS P., FONTURBEL T., PÉREZ-GOROSTIAGA P., FERNANDEZ C., 1998. Predicting fire behaviour in Galician (NW Spain) shrubland fuel complexes. In 'Proceedings of the 3rd International Conference on Forest Fire Research and 14th Fire and Forest Meteorology', 16–20 November 1998, Luso–Coimbra. (Ed. DX Viegas) pp. 713–728. (ADAI, University of Coimbra: Coimbra, Portugal)

VÉLEZ R., 2009. La Defensa contra Incendios Forestales. Fundamentos y experiencias. McGrawHill

VIEGAS D.X. and SIMEONI A., 2011. Eruptive behaviour of forest fires. *Fire Technology*; 47: 303-320.

- **Legislación**

BOE núm. 23 de 27 de Enero de 1994. Ley 3/1993, de 9 de diciembre, Forestal de la Comunidad Valenciana.

DOGV núm. 5062, de 2 de agosto de 2005. Resolución de 29 de julio de 2005, de la Conselleria de Territorio y Vivienda, por la que se declaran los terrenos forestales de la Comunidad Valenciana zona de alto riesgo de incendio.

Generalitat Valenciana, 2009. Plan de prevención de incendios de la Demarcación Forestal de Xàtiva. Disponible on-line: <http://www.cma.gva.es/web/indice.aspx?nodo=68906&idioma=C>